



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบเวลาจริง (DEVELOPMENT OF REAL-TIME DIGITAL AUDIO WATERMARKING TECHNIQUE)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการทำลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบเวลาจริง (DEVELOPMENT OF REAL-TIME DIGITAL AUDIO WATERMARKING TECHNIQUE)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2555

บทคัดย่อ

การทำลายน้ำดิจิทัล เป็นวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญาของข้อมูลดิจิทัลมัลติมีเดีย โดยทำการฝังเครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะซึ่งใช้แสดงความเป็นเจ้าของลงในข้อมูลดิจิทัลก่อนที่จะทำการเผยแพร่สู่สาธารณชน เครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะนี้เรียกว่า “ลายน้ำดิจิทัล (Digital watermark)” ข้อมูลข่าวสารที่ใช้ในการออกแบบลายน้ำดิจิทัลอาจเป็น ตัวเลข ตัวอักษร รูปภาพ สัญลักษณ์ หรือข้อมูลดิจิทัลอื่น ๆ เป็นต้น ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงไปในนั้นจะอยู่ในลักษณะที่ติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับข้อมูลดิจิทัลซึ่งทำให้ยากต่อการลบออกหรือทำลาย นอกจากนี้ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงไปในนั้นต้องไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลมัลติมีเดียลดต่ำลงจนเกินไป สัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปในนั้นจะต้องมีความทนทานต่อการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น การเข้ารหัส-ถอดรหัสสัญญาณ การบีบอัดสัญญาณและการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบพื้นฐาน สัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปในนี้สามารถทำการคัดแยกหรือกู้กลับคืนมาได้ด้วยอัลกอริทึมการคัดแยกสัญญาณลายน้ำและการใช้กุญแจลับที่ถูกต้อง โดยสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการระบุเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริงได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทานโดยใช้เวฟเล็ตในการแปลงสัญญาณ และทำการฝังสัญญาณลายน้ำลงในสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่อยู่ในแบนด์ย่อยความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำสุดด้วยเทคนิคของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต อัลกอริทึมดังกล่าวได้ทำการออกแบบ จำลองผล สังเคราะห์และสร้างจริงโดยใช้ฮาร์ดแวร์ดิจิทัลเอฟพีจีเอ (FPGA) จากการทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตและการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า วิธีการที่นำเสนอให้คุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตที่ดีและมีความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีแบบต่าง ๆ ดังได้นำเสนอไว้ในรายงานฉบับนี้

คำหลัก : ลายน้ำดิจิทัล การแปลงเวฟเล็ต การตรวจจับสัญญาณลายน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล และรองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่สถานวิจัยสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความสะดวกในด้านข้อมูล งานเอกสาร แบบฟอร์มต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการดำเนินโครงการวิจัย จนทำให้งานเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ พุทธาวุฒิ ลีกุลธร นักศึกษาปริญญาโทที่ช่วยงานวิจัย ทำการทดลอง เก็บข้อมูลการวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคม ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี

ประโยชน์ คำสวัสดิ์



บทคัดย่อ

การทำลายน้ำดิจิทัล เป็นวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญาของข้อมูลดิจิทัลมัลติมีเดีย โดยทำการฝังเครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะซึ่งใช้แสดงความเป็นเจ้าของลงในข้อมูลดิจิทัลก่อนที่จะทำการเผยแพร่สู่สาธารณะชน เครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะนี้เรียกว่า “ลายน้ำดิจิทัล (Digital watermark)” ข้อมูลข่าวสารที่ใช้ในการออกแบบลายน้ำดิจิทัลอาจเป็น ตัวเลข ตัวอักษร รูปภาพ สัญลักษณ์ หรือข้อมูลดิจิทัลอื่น ๆ เป็นต้น ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงไปนั้นจะอยู่ในลักษณะที่ติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับข้อมูลดิจิทัลซึ่งทำให้ยากต่อการลบออกหรือทำลาย นอกจากนี้ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงไปนั้นต้องไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลมัลติมีเดียลดต่ำลงจนเกินไป สัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปจะต้องมีความทนทานต่อการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น การเข้ารหัส-ถอดรหัสสัญญาณ การบีบอัดสัญญาณและการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบพื้นฐาน สัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปนี้สามารถทำการคัดแยกหรือกู้กลับคืนมาได้ด้วยอัลกอริทึมการคัดแยกสัญญาณลายน้ำและการใช้กุญแจลับที่ถูกต้อง โดยสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการคัดแยกดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการระบุเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริงได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทานโดยใช้เวฟเล็ตในการแปลงสัญญาณ และทำการฝังสัญญาณลายน้ำลงในสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่อยู่ในแบนด์ย่อยความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำสุด ด้วยเทคนิคของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต อัลกอริทึมดังกล่าวได้ทำการออกแบบ จำลองผล สังเคราะห์และสร้างจริงโดยใช้ฮาร์ดแวร์ดิจิทัล เอฟพีจีเอ (FPGA) จากการทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตและการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำพบว่า วิธีการที่นำเสนอให้คุณภาพของสัญญาณเสียงเอาต์พุตที่ดีและมีความทนทานของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีแบบต่าง ๆ ดังได้นำเสนอไว้ในรายงานฉบับนี้

คำหลัก : ลายน้ำดิจิทัล การแปลงเวฟเล็ต การตรวจจับสัญญาณลายน้ำ

Abstract

Digital watermarking is an emerging technology that embeds hidden copyright information directly into the digital multimedia content in such a way that it always remains present. The embedded information data is referred to as “watermark”. Ideally, there should be no perceptible difference between the watermarked and original data, and the watermark should be easily extractable, reliable and robust against decryption, re-encryption, compression and common signal processing. The information carried by the watermark can be accessed using a detection algorithm with the help of a secret key and can be used to identify the copyright holder and ensure proper payment of royalties. In this paper, a robust watermarking scheme for digital audio signal is proposed. The watermarks are embedded into the middle-low frequency coefficients in discrete wavelet transform domain. The difference between local average and local second average values of discrete wavelet transform coefficient is modified to embed the watermark. This audio watermarking algorithm is designed, simulated, synthesized and implemented on Field Programmable Gate Array (FPGA). The experimental results show that the proposed scheme yields the watermark audio signal with high quality and the watermark survives to several of the attacks which were included in this study.

Keywords : Digital watermark, Wavelet transform, Watermark detection

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมุติฐานของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอล	
บทนำ.....	4
ลายน้ำดิจิตอล.....	4
ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิตอล.....	7
การแปลงโดเมนสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบคัสคริต.....	10
การทดสอบลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอล.....	16
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
สรุปเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอล.....	20
บทที่ 3 การทำลายน้ำโดยเทียบค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต	
บทนำ.....	21
การเตรียมข้อมูลก่อนทำลายน้ำดิจิตอล.....	22
เทคนิคการฝังและถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอล.....	24
การทดลองฝังลายน้ำในกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่าง ๆ.....	25
การทดลองระดับความเข้มของการฝังลายน้ำ.....	27

สารบัญ(ต่อ)

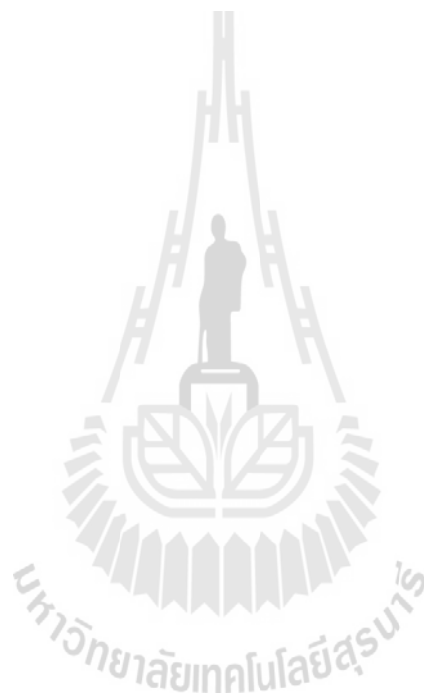
	หน้า
การปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจ.....	29
ความทนทานของลายน้ำ ต่อการ โจมตีรูปแบบต่าง ๆ.....	31
สรุปค่าความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ.....	38
สรุป	40
บทที่ 4 การค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของการถอดลายน้ำ	
บทนำ	41
การค้นหาตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	41
เทคนิคการทำลายน้ำแบบเวลาจริง.....	43
สรุป	46
บทที่ 5 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์	
บทนำ.....	48
วงจรการถอดลายน้ำ.....	48
วงจรภาค Input และ Output	49
วงจรหน่วยประมวลผลกลางและแหล่งจ่ายพลังงาน.....	50
แผ่นวงจรฮาร์ดแวร์.....	52
โปรแกรมการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA.....	56
โปรแกรมแสดงผลการถอดลายน้ำด้วยคอมพิวเตอร์.....	59
สรุป	60
บทที่ 6 ผลการทำงานวงจรถอดลายน้ำแบบเวลาจริง	
บทนำ	61
ผลการจำลองอัลกอริทึมโดยโปรแกรม MATLAB	61
ผลการทดลองอัลกอริทึมโดยใช้ FPGA	73
สรุป	75
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
บทนำ	76
สรุปผลการวิจัย.....	76
ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	77
บรรณานุกรม	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย.....	80
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	90



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เทคนิคการทำลายน้ำ.....	6
3.1 ค่า BER ต่อการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่างๆ.....	39
3.2 ผลจากการโจมตีด้วย การขยายสัญญาณ และ DAC & ADC.....	40
3.3 ผลการทดลองด้วยตัวอย่างเพลงตามประเภทต่างๆ.....	40
5.1 การกำหนดค่าความคุ้มครองการทำงานของ PCM1808.....	56
6.1 ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ.....	62
6.2 เกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียง (Mean opinion score, MOS).....	62
6.3 ผลการประเมินคุณภาพเสียง.....	62
6.4 ผลการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจากการโจมตีแบบต่าง ๆ.....	63



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ลายน้ำที่ปรากฏอยู่ในธนบัตร.....	4
2.2 ตัวอย่างภาพลายน้ำในงานจิตรกรรม.....	5
2.3 การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	7
2.4 ขั้นตอนการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบ PCM.....	7
2.5 ตัวอย่างต้นฉบับและสัญญาณที่ได้จากการ Sampling.....	8
2.6 ตัวอย่างการทำ Quantization และการเข้ารหัส.....	9
2.7 Two channel analysis filter banks.....	11
2.8 Two channel synthesis filter banks.....	11
2.9 Two channel analysis filter bank.....	12
2.10 Octave analysis filter banks	13
2.11 Octave synthesis filter banks 2 chanel.....	14
2.12 Octave synthesis filter banks 3 chanel.....	14
2.13 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องเพื่อสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลออกเป็น 4 ย่านความถี่.....	15
2.14 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องโครงสร้างแบบต้นไม้สังเคราะห์กลุ่มย่านความถี่ต่าง ๆ.....	15
2.15 องค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	18
2.16 อัลกอริทึมหลักการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบ Adaptive Tabu Search.....	19
2.17 การหาค่าเฉลี่ยเพื่อปรับค่า Alpha แบบ Adaptive Tabu Search.....	19
3.1 ขั้นตอนการฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	21
3.2 ขั้นตอนการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล.....	22
3.3 การเปลี่ยนภาพลายน้ำ 2 มิติ เป็นข้อมูล 1 มิติ.....	23
3.4 การแบ่งส่วนข้อมูลก่อนการฝังลายน้ำ.....	23
3.5 ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel.....	23
3.6 การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ตามเงื่อนไข.....	24
3.7 การตัดสินใจค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม เป็น บิต '1' หรือ บิต '0'.....	25
3.8 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่ต่ำ.....	26
3.9 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ.....	26
3.10 ลายน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพ Binary ขนาด 64 X 64 Pixels.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า NC.....	28
3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า BER.....	28
3.13 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า NC.....	29
3.14 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า BER.....	30
3.15 การปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า SNR.....	30
3.16 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Noise Attacks.....	31
3.17 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Noise Attacks.....	32
3.18 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Low-pass Filter.....	33
3.19 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Low-pass Filter.....	33
3.20 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน High-pass Filter.....	34
3.21 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน High-pass Filter.....	35
3.22 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Band-pass Filter.....	36
3.23 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Band-pass Filter.....	36
3.24 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน MP3 Compression.....	37
3.25 ค่า Alpha เทียบกับ NC และ BER เมื่อผ่าน MP3 Compression.....	38
3.26 ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี โดยมีระดับค่า BER ต่างๆ.....	39
4.1 อัลกอริทึมการหาค่า BER เทียบกับการเลื่อนตำแหน่งเริ่มต้น.....	41
4.2 ค่า BER เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	42
4.3 ค่า BER ช่วงเข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ.....	42
4.4 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้น.....	43
4.5 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นฝั่ง.....	44
4.6 การเตรียมหน่วยความจำของภาพลายน้ำที่ถอดได้.....	45
4.7 แผนภาพการทำงานของ การถอดลายน้ำ.....	46
4.8 อัลกอริทึมการถอดลายน้ำในเวลาจริง.....	46
5.1 แผนภาพวงจรถอดลายน้ำดิจิทัล.....	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 วงจรภาครับสัญญาณเสียง โดยใช้ PCM1808.....	49
5.3 วงจรเชื่อมต่อผ่าน USB ด้วยชิพ FT245RL.....	50
5.4 การเชื่อมต่อ FPG เข้ากับภาค Input Output และหน่วยความจำ.....	50
5.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรถอดลายน้ำ.....	51
5.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB.....	52
5.7 ตำแหน่งบัดกรีอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB.....	52
5.8 ลายทองแดงของวงจรด้านบน.....	53
5.9 ลายทองแดงของวงจรด้านล่าง.....	53
5.10 แผ่นทองแดงด้านบนเมื่อกัดเสร็จแล้ว.....	54
5.11 แผ่นทองแดงด้านล่างเมื่อกัดเสร็จแล้ว.....	54
5.12 วงจรด้านบนเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	55
5.13 วงจรด้านล่างเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์.....	55
5.14 บล็อกไดอะแกรมการถอดลายน้ำในวงจรภายนอก.....	56
5.15 มาตรฐานการส่งข้อมูลแบบ I2S 24 bit.....	57
5.16 การแยกย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำโดยวิธีการของ Haar wavelet.....	57
5.17 อัลกอริทึมการจัดเรียงข้อมูล 4 กลุ่มหลังการแปลงเวฟเลต.....	58
5.18 การจัดเรียงข้อมูล 8 บิตก่อนส่งผ่านช่องทาง USB.....	58
5.19 แบบจำลองของโมดูล D2XX.....	59
5.20 อัลกอริทึมการจัดเรียงภาพลายน้ำ 256 ภาพ.....	59
5.21 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการทำงาน.....	60
6.1 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ แบบไม่มีการโจมตี รูปแบบเพลง Pop.....	64
6.2 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ Noise รูปแบบเพลง Pop.....	64
6.3 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ High pass รูปแบบเพลง Pop.....	65
6.4 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ Low pass รูปแบบเพลง Pop.....	65
6.5 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ MP3 รูปแบบเพลง Pop.....	66
6.6 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำ โดยการโจมตีแบบ ADC&DAC รูปแบบเพลง Pop.....	66
6.7 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Dance.....	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Pop.....	67
6.9 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Rock.....	68
6.10 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง.....	68
6.11 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง.....	69
6.12 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงเซิ้งโปงลาง.....	69
6.13 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Dance.....	70
6.14 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Pop.....	70
6.15 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Rock.....	71
6.16 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง.....	71
6.17 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง.....	72
6.18 กราฟค่า BER ในกรณีที่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงเซิ้งโปงลาง.....	72
6.19 เปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ถอดได้และภาพลายน้ำที่ต้องการ.....	73
6.20 การเชื่อมต่อวงจรถอดลายน้ำ.....	73
6.21 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำ.....	74
6.22 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่ไม่มีภาพลายน้ำ.....	74
6.23 ในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำแต่มิใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง.....	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีดิจิทัลมีเดีย เทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมและเครือข่ายคอมพิวเตอร์มีความเจริญรุดหน้าไปมาก เทคโนโลยีดังกล่าวเหล่านี้ทำให้เนื้อหาของสื่อผสมในรูปแบบดิจิทัล (Digital multimedia contents) สามารถทำการส่งผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้อย่างสะดวก รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ทำให้ข้อมูลดังกล่าวเกิดการแพร่กระจายไปทั่วโลกได้อย่างรวดเร็ว ประกอบกับข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลสามารถทำการประมวลผลได้ง่ายด้วยซอฟต์แวร์ที่มีอยู่มากมาย สามารถทำการคัดลอกโดยไม่มีการลดทอนหรือสูญเสียคุณภาพของสัญญาณ รวมทั้งยังสามารถทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไขในตัวเนื้อหาข้อมูลได้ง่ายอีกด้วย จึงส่งผลให้มีการใช้งานข้อมูลดิจิทัลมีเดียทั้งภาพและเสียงกันอย่างกว้างขวาง

ปัญหาหนึ่งที่ตามมาคือ การละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญาของเจ้าของข้อมูลดิจิทัลมีเดีย เช่น การปลอมแปลง การดัดแปลง การทำซ้ำ การนำเสนอ การเผยแพร่หรือแจกจ่ายโดยปราศจากความยินยอมจากเจ้าของข้อมูล ซึ่งอาจจะทำให้เจ้าของข้อมูลต้องเสียชื่อเสียงหรือสูญเสียรายได้ที่พึงได้รับ จึงจำเป็นต้องมีการคิดค้นและพัฒนาวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญา วิธีการหนึ่งที่นิยมนำมาใช้คือการเข้ารหัสลับ (Encryption) แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้ทั้งหมด เนื่องจากการเข้ารหัสลับเป็นการป้องกันการเข้าถึงตัวข้อมูลในระหว่างการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายสื่อสาร โดยมีการใช้กุญแจลับในการเข้ารหัสเพื่อสร้างข้อความไซเฟอร์ (Cipher text) ที่มีรูปแบบซึ่งต่างไปจากข้อมูลต้นฉบับโดยสิ้นเชิงก่อนที่จะส่งผ่านเครือข่ายการสื่อสาร อย่างไรก็ตาม การเข้ารหัสลับนี้มิได้เปลี่ยนแปลงเนื้อหาในตัวข้อมูลแต่อย่างใด ดังนั้นเมื่อข้อความไซเฟอร์ถึงปลายทางและถูกทำการถอดรหัสลับ (Decryption) ด้วยกุญแจลับที่ถูกต้อง ก็จะได้ข้อมูลที่เหมือนข้อมูลต้นฉบับทุกประการ และเมื่อทำการถอดรหัสลับแล้วการป้องกันข้อมูลชุดนั้นก็สิ้นสุดลง แนวทางหนึ่งที่จะสามารถป้องกันข้อมูลดิจิทัลมีเดียจากปัญหาดังกล่าวนี้ได้คือ “การทำลายน้ำดิจิทัล (Digital watermarking)”

การทำลายน้ำดิจิทัล เป็นวิธีการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์และทรัพย์สินทางปัญญาของข้อมูลดิจิทัลมีเดีย โดยทำการใส่เครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะซึ่งใช้แสดงความเป็นเจ้าของลงในข้อมูลดิจิทัลก่อนที่จะทำการเผยแพร่สู่สาธารณชน เครื่องหมายหรือรหัสเฉพาะนี้เรียกว่า “ลายน้ำดิจิทัล (Digital watermark)” ข้อมูลข่าวสารที่ใช้ในการออกแบบลายน้ำดิจิทัลอาจเป็น ตัวเลข ตัวอักษร รูปภาพ สัญลักษณ์ หรือข้อมูลดิจิทัลอื่น ๆ ลายน้ำดิจิทัลที่ใส่ลงไปนั้นจะอยู่ในลักษณะที่ฝังติดแน่นเป็นเนื้อเดียวกับข้อมูลดิจิทัลซึ่งทำให้ยากต่อการลบออกหรือทำลาย นอกจากนี้ลายน้ำดิจิทัลที่ฝังลงไปนั้นต้องไม่ทำให้คุณภาพของข้อมูลดิจิทัลมีเดียลดต่ำลงจนเกินไป

การทำลายน้ำดิจิทัลสามารถประยุกต์ใช้กับสื่อผสมในรูปแบบดิจิทัลได้ทุกประเภท เช่น ภาพนิ่ง ภาพวิดีโอ เสียงเพลง เสียงดนตรี เป็นต้น และสำหรับในโครงการวิจัยนี้จะให้ความสนใจเฉพาะการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทาน (Robust digital audio watermarking) โดยใช้การแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) เพื่อประยุกต์ใช้งานกับการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ (Copyright protection) สัญญาณเสียงแบบดิจิทัล

การทำลายน้ำดิจิทัลเพื่อประยุกต์ใช้กับการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์ จะทำการฝังสัญญาณลายน้ำลงในข้อมูลเสียงต้นฉบับ และทำการโจมตีสัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปด้วยการประมวลผลสัญญาณแบบต่าง ๆ จากนั้นนำสัญญาณที่ผ่านการโจมตีมาทำการตรวจจับหรือคัดแยกสัญญาณลายน้ำ โดยสัญญาณลายน้ำที่ทำการคัดแยกได้จะถูกใช้ในการระบุถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่ถูกต้อง การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมประกอบด้วย การวัดคุณภาพของสัญญาณเอาต์พุต และการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ สถานการณ์ที่จะใช้ในการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำได้แก่ การโจมตีสัญญาณลายน้ำด้วยการบีบอัดสัญญาณ MP3 compression การกรองสัญญาณด้วย Highpass filtering Lowpass filtering และการเพิ่มสัญญาณรบกวน Additive white noise เป็นต้น

งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมการทำลายน้ำสัญญาณเสียงที่มีความทนทานของสัญญาณลายน้ำสูงและการตรวจจับสัญญาณลายน้ำสามารถทำงานได้แบบเวลาจริง โดยสัญญาณลายน้ำจะต้องมีความทนทานต่อการบีบอัดสัญญาณและมีความทนทานต่อกระบวนการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ส่วนในด้านคุณภาพของสัญญาณนั้น สัญญาณลายน้ำที่ฝังลงไปจะต้องไม่ทำให้เกิดการรบกวนจนสังเกตได้ว่าแตกต่างไปจากสัญญาณเสียงต้นฉบับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการสร้างสัญญาณลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัล เพื่อประยุกต์ใช้ในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์
2. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการฝังสัญญาณลายน้ำในโดเมนของการแปลงเวฟเลต
3. เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับหรือคัดแยกสัญญาณลายน้ำในโดเมนของการแปลงเวฟเลต
4. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบการตรวจจับสัญญาณลายน้ำแบบเวลาจริง
5. เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมเนื่องจากปัญหาการละเมิดสิทธิทางปัญญา

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1. องค์ประกอบของสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการแปลงสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกน้อยที่สุด แต่ยังสามารถคงรูปร่างของสัญญาณเดิมอยู่คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ
2. ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นจากกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำดิจิทัลนั้น สามารถทำการหลีกเลี่ยงได้ด้วยวิธีการคัดเลือกย่านความถี่ของสัญญาณที่มีผลกระทบต่อสัญญาณน้อยที่สุดโดยใช้เทคนิคการแปลงเวฟเล็ต

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. การพัฒนาอัลกอริทึมการฝังสัญญาณลายน้ำและการตรวจจับหรือคัดแยกสัญญาณลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลในโดเมนของการแปลงเวฟเล็ต
2. สัญญาณเสียงเอาต์พุตที่ได้จากการฝังสัญญาณลายน้ำต้องมีค่า SNR (Signal to noise ratio) ไม่ต่ำกว่า 20 dB และสัญญาณลายน้ำต้องมีค่า Data payload ไม่ต่ำกว่า 20 bps (Bit per-second) ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ International Federation of Phonographic Industry (IFPI)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อัลกอริทึมการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในโดเมนของการแปลงเวฟเล็ต สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการป้องกันการละเมิดลิขสิทธิ์สัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งจะเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป
2. ได้ชุดต้นแบบการตรวจจับสัญญาณลายน้ำสำหรับสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบเวลาจริง
3. ได้แนวทางในการลดปัญหาทางเศรษฐกิจและสังคมอันเนื่องมาจากการละเมิดลิขสิทธิ์
4. ได้บทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติ

บทที่ 2

เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

2.1 บทนำ

การทำลายน้ำบนวัสดุเป็นการเพิ่มเอกลักษณ์เฉพาะเพื่อให้ชิ้นงานมีจุดสังเกตซึ่งจะทำให้สามารถสืบค้นได้ถึงความเป็นตัวตนของชิ้นงานนั้น ซึ่งเทคนิคในการทำลายน้ำจะมีขั้นตอนวิธีการที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทำลายน้ำ เช่นการทำลายน้ำในกระดาษ จะใช้วิธีการถ่ายภาพที่สามารถสังเกตได้ โดยจะปรากฏเป็นสีจาง ๆ เมื่อนำมาส่องผ่านแสง หรือการใช้หมึกที่เรืองแสงเมื่อส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น ส่วนการทำลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัลนั้น จะมีขั้นตอนทางเทคนิคเฉพาะสำหรับการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นฐานของข้อมูลสัญญาณเสียง เพื่อให้เกิดลักษณะเฉพาะของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล โดยการปรับแก้ดังกล่าวจะต้องไม่ไปกระทบคุณภาพของสัญญาณเสียงต้นฉบับหรือทำให้มีผลกระทบน้อยที่สุด

2.2 ลายน้ำดิจิทัล

การใช้งานลายน้ำที่พบกันโดยทั่วไปคือการทำลายน้ำในธนบัตร ซึ่งเป็นการถ่ายภาพที่สามารถสังเกตได้ด้วยวิธีการส่องผ่านแสง หรือการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตส่องเพื่อให้ภาพนั้นปรากฏขึ้นมา ซึ่งการทำลายน้ำบนธนบัตรมีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้ทราบว่าธนบัตรใบนั้นเป็นของจริงหรือของปลอม



รูปที่ 2.1 ลายน้ำที่ปรากฏอยู่ในธนบัตร

จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าเทคนิคการทำลายน้ำบนธนบัตรเป็นการเขียนภาพซ้อนเข้าไปใน
กลางเยื่อกระดาษ และวิธีการตรวจหาลายน้ำคือการใช้แสงส่องผ่าน แต่ลายน้ำบางประเภทจะใช้วิธี
วาดภาพด้วยสีจางๆ ก่อนที่จะวาดภาพจริงทับลงไป เพื่อแสดงถึงความเป็นเจ้าของหรือการแสดงให้เห็น
เห็นว่าภาพนั้นคือภาพของจริง โดยส่วนใหญ่จะพบได้ในงานจิตรกรรมรูปภาพ และเมื่อสังเกตให้ดี
จะสามารถมองเห็นภาพลายน้ำได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพลายน้ำในงานจิตรกรรม

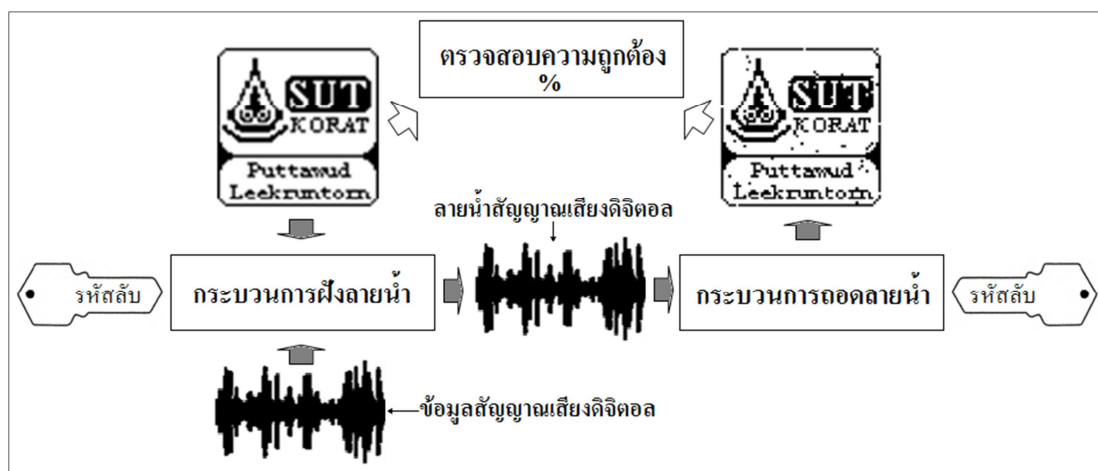
รูปแบบลายน้ำทั้งสองตัวอย่างที่กล่าวถึงนั้นเป็นรูปแบบการทำลายน้ำที่มองเห็นได้ด้วยตา
เปล่า หรือเห็นได้ด้วยวิธีการถอดลายน้ำเช่นใช้แสงส่องผ่าน ซึ่งคุณสมบัติของลายน้ำจะขึ้นอยู่กับ
ความต้องการในการใช้งานเช่นการทำลายน้ำดิจิทัลจะต้องคำนึงถึงลักษณะของข้อมูลไม่ว่าจะอยู่
ในรูปแบบของข้อความ ข้อมูลรูปภาพ สัญญาณเสียง หรือ ภาพเคลื่อนไหว และยังต้องคำนึงถึงความ
ทนทานของลายน้ำเมื่อข้อมูลดิจิทัลได้ผ่านการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ทั้งนี้การทำลายน้ำจะต้องมี
ผลกระทบกับข้อมูลดั้งเดิมให้น้อยที่สุด ซึ่งเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลสามารถสรุปเป็นรูปแบบได้
ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 เทคนิคการทำลายน้ำ

คุณสมบัติการทำลายน้ำ	รูปแบบการทำลายน้ำ
ประเภทของข้อมูล	Text – Image – Video – Audio
คุณสมบัติลายน้ำ	Visible – Invisible
โดเมนที่ใช้ฝังลายน้ำ	Spatial domain – Transform domain
กระบวนการถอดลายน้ำ	Private – Semi Private – Public

จากเทคนิคการทำลายน้ำในตารางที่ 2.1 ขั้นตอนแรกจะต้องคำนึงถึงประเภทของข้อมูลที่ต้องการทำลายน้ำ เพื่อจะสามารถคิดค้นวิธีการที่เหมาะสมในการทำลายน้ำ และต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของลายน้ำเมื่อผ่านกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำว่าจะสามารถแสดงให้ผู้ใช้งานสังเกตเห็นได้โดยทั่วไปหรือไม่ เพราะเนื่องจากการทำลายน้ำในบางครั้งผู้ใช้งานอาจจะต้องการแสดงหรือไม่ต้องการแสดงให้บุคคลทั่วไปทราบได้ นอกจากนี้จะต้องพิจารณาถึงโดเมนที่ใช้ในกระบวนการฝังเพราะถ้าฝังลายน้ำในโดเมนปกติ (Spatial domain) ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการฝังลายน้ำแบบสังเกตเห็นได้โดยทั่วไป แต่ถ้าฝังลายน้ำแบบซ่อนไม่ให้ลายน้ำปรากฏเห็นได้ ส่วนใหญ่จะฝังลายน้ำโดยทำการแปลงโดเมนก่อนที่ทำการฝัง (Transform domain) และในวิธีการฝังลายน้ำจะรบกวนข้อมูลต้นฉบับน้อยกว่าและสัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากกว่า ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมในการฝังลายน้ำ ส่วนวิธีที่ใช้ในการถอดลายน้ำผู้ฝังสามารถที่จะกำหนดได้ว่า ต้องการให้บุคคลทั่วไปสามารถถอดลายน้ำได้ด้วยวิธีการง่ายๆ เช่นการมองเห็นได้ด้วยตนเองหรือการสังเกตอย่างง่ายๆ แต่ถ้าต้องการให้ลายน้ำสามารถถอดได้เฉพาะกลุ่มบุคคลก็สามารถที่จะเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งเมื่อต้องการถอดลายน้ำจะต้องถอดรหัสด้วยวิธีการที่ทราบเฉพาะกลุ่มบุคคลที่ควรทราบเท่านั้น หรือมีการใส่ชุดตัวเลขเข้าไปในกระบวนการเข้ารหัสซึ่งตัวเลขที่ใช้นั้นอาจจะเรียกได้ว่าเป็นกุญแจสำหรับการถอดลายน้ำก็ได้

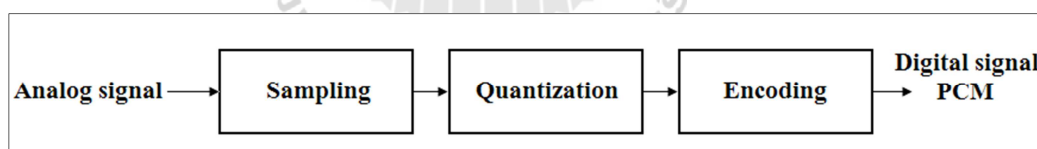
งานวิจัยชิ้นนี้มีเป้าหมายในการฝังลายน้ำเข้าไปในข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล และสัญญาณลายน้ำสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณเสียงจากสัญญาณเสียงดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และเปลี่ยนจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อถอดลายน้ำอีกครั้งคุณสมบัติของลายน้ำเป็นรูปแบบที่ไม่สามารถรับรู้ได้ ทำให้การฝังลายน้ำต้องอาศัยการแปลงโดเมนเพื่อให้มีผลกระทบต่อเสียงน้อยที่สุด ส่วนการถอดลายน้ำจะเป็นขั้นตอนที่ทำย้อนกลับกับกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยมีแผนภาพการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

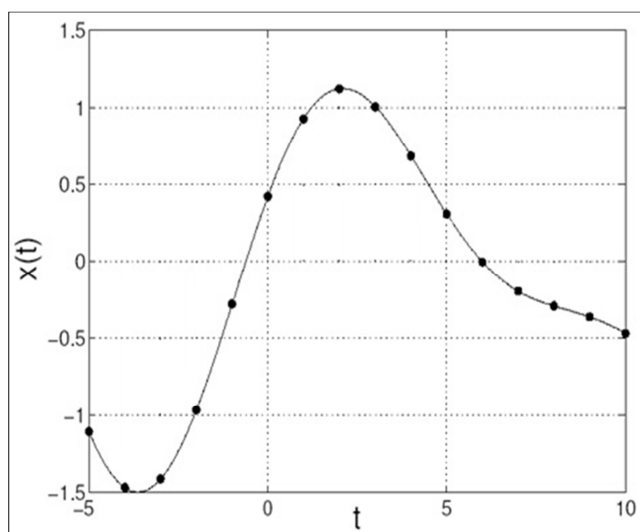
2.3 ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล

ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบการมอดูเลตโดยใช้พัลส์แบบ Pulse code modulation (PCM) ลักษณะการมอดูเลตแบบนี้สามารถแยกการทำงานออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การชักตัวอย่าง (Sampling) การทำควอนไทเซชัน (Quantization) และ การเข้ารหัส (Encoding)

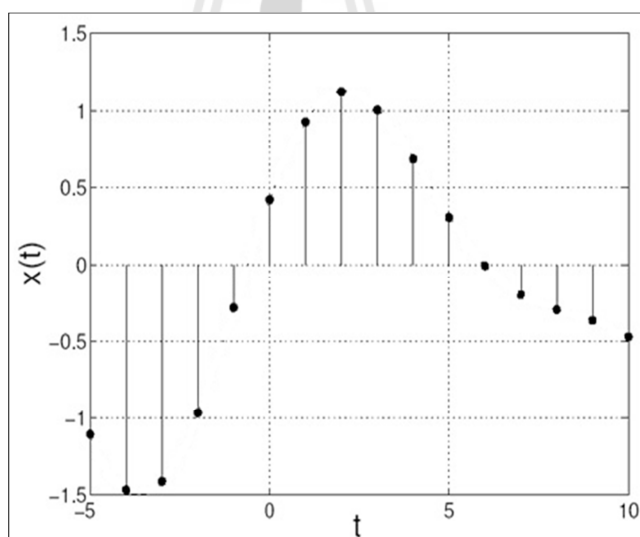


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการมอดูเลตสัญญาณเสียงแบบ PCM

ในขั้นตอนการทำงาน เมื่อสัญญาณเสียงแอนะล็อกเข้าสู่กระบวนการจะถูกชักตัวอย่างด้วยวงจรการชักตัวอย่าง โดยมีการชักตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอด้วยค่าความถี่ที่คงที่ค่าหนึ่ง และเป็นไปตามทฤษฎีของการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะต้องทำการการชักตัวอย่างในความถี่ที่มากกว่า 2 เท่าของความถี่สัญญาณเสียงสูงสุด เช่นถ้าความถี่สูงสุดของสัญญาณเสียงอยู่ที่ 20 KHz ค่าของความถี่การชักตัวอย่างควรมากกว่า 40 KHz เป็นต้น



ก. สัญญาณต้นฉบับ

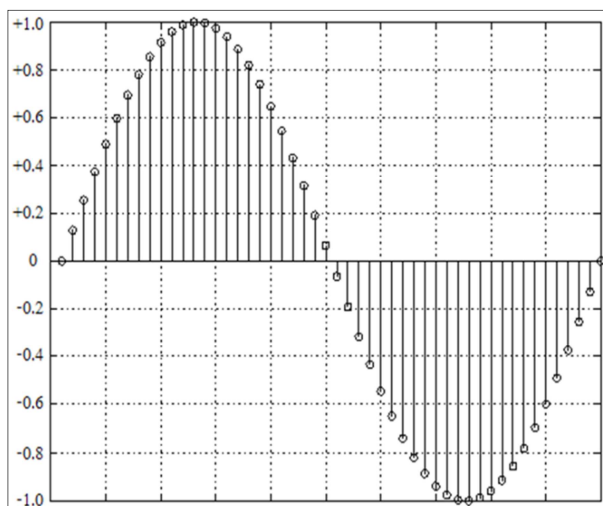


ข. สัญญาณที่ได้จากการการชักตัวอย่าง

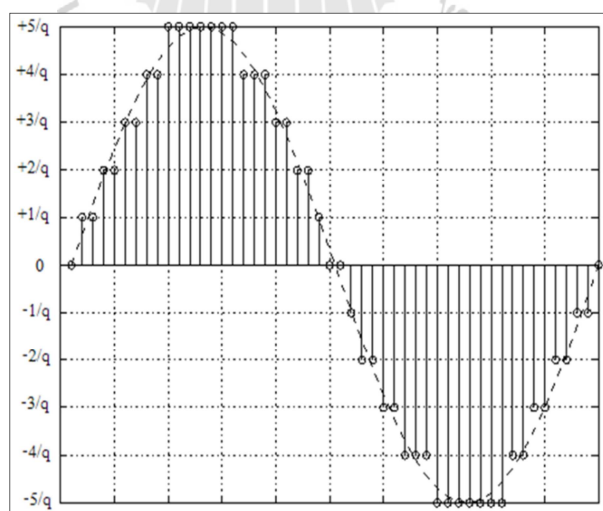
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างต้นฉบับและสัญญาณที่ได้จากการการชักตัวอย่าง

ส่วนการทำ Quantization มีการแบ่งระดับแอมพลิจูดของสัญญาณออกเป็นช่วงสั้น ๆ ขนาดเท่ากัน โดยที่ระดับของสัญญาณที่กำหนดขึ้นต้องครอบคลุมขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมด เช่น ขนาดของสัญญาณที่ต้องการทำ Quantization มีแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุด

เท่ากับ $+1V$ ถึง $-1V$ และแบ่งช่วงของแอมพลิจูดออกเป็น q ช่วงเท่ากัน ดังนั้นความกว้างของช่วงที่ทำ Quantization มีค่าเท่ากับ $2/q$ V ซึ่งหมายถึงระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดถึงต่ำสุดของสัญญาณ นำมาหารจำนวนช่วงของการทำ Quantization ทำให้ได้ความกว้างในแต่ละระดับในการทำ Quantization นั้นเอง



ก. การชักตัวอย่าง



ข. Quantization

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการทำ Quantization และการเข้ารหัส

จากรูปตัวอย่างการทำ Quantization ในรูปที่ 2.6 นั้นข้อมูลที่ได้จะออกมาเป็นตัวเลขไบนารี ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเข้ารหัสข้อมูลสัญญาณเสียงแบบ PCM ซึ่งเมื่อพิจารณาให้ดีจะพบว่า ข้อมูลที่ได้ในแต่ละจุดของการการชักตัวอย่าง เมื่อผ่านการทำ Quantization ค่าที่ได้จะไม่ใช้ระดับที่แท้จริงขนาดแอมพลิจูดเนื่องจากการทำ Quantization จะเป็นการปัดค่าของแอมพลิจูดเข้าสู่ค่าของการทำ Quantization ที่ได้แบ่งไว้ กระบวนการนี้จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณเสียงทำให้ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ได้มีโอกาสผิดเพี้ยนไปสัญญาณเสียงต้นฉบับ หรือกล่าวได้ว่าระดับของการทำ Quantization มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณเสียง เช่นถ้าต้องการให้คุณภาพของสัญญาณเสียงดีขึ้นจะต้องเพิ่มระดับของการทำ Quantization ให้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการเข้ารหัสไบนารีทำให้ระดับการทำ Quantization มีค่าเท่ากับ $2^{\text{บิตเลขไบนารี}}$ เช่นถ้าเข้ารหัสเลขไบนารีขนาด 16 Bits จะได้ระดับการทำ Quantization เท่ากับ 65,536 ระดับ

ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้น จะอยู่ในชุดข้อมูลแบบ PCM และจะมีตัวเลขที่สำคัญที่จะต้องพิจารณานั้นก็คือ ค่าความถี่การชักตัวอย่างและจำนวนบิตของเลขไบนารีที่ใช้ในการเข้ารหัส เช่น มาตรฐานของข้อมูลสัญญาณในแผ่น Compact disc (CD) เป็นแบบ PCM 48 KHz 16Bits Stereo หมายถึงข้อมูลสัญญาณเสียงที่อยู่ในรูปแบบของ PCM ช่องสัญญาณแบบ Stereo ความถี่ในการ Sampling อยู่ที่ 48 KHz หรือช่วงเวลาในการชักตัวอย่างที่ $20.833\mu\text{sec}$ และมีการเข้ารหัสเลขไบนารีขนาด 16 Bits ระดับการทำ Quantization เท่ากับ 65,536 ระดับ ซึ่งข้อมูลของสัญญาณเสียงนี้จะเป็นประโยชน์เพื่อใช้ในการออกแบบอัลกอริทึมการทำลายสัญญาณเสียงดิจิทัล

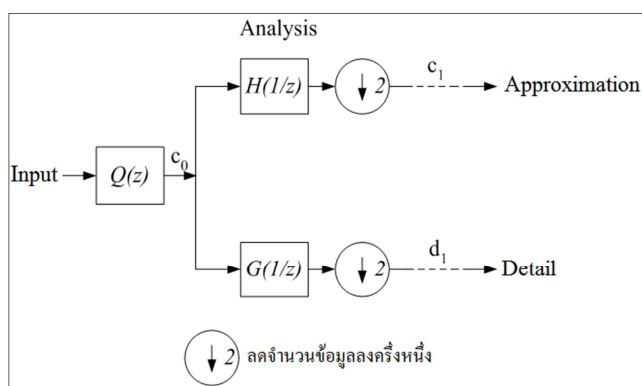
2.4 การแปลงโดเมนสัญญาณโดยใช้การแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต

กระบวนการหนึ่งที่ใช้ร่วมกับการฝังลายน้ำดิจิทัลโดยทั่วไปคือการแปลงแบบ Discrete Wavelet Transform (DWT) เป็นการแยกกลุ่มของสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน ในแต่ละระดับจะประกอบไปด้วย ข้อมูลซึ่งเป็นเนื้อหาของข้อมูล (Low pass) และส่วนที่เป็นรายละเอียด (High pass) ซึ่งประโยชน์ DWT จะช่วยให้สามารถเลือกกลุ่มของข้อมูลที่จะฝังลายน้ำลงไป และในด้านการถอดลายน้ำจะสามารถแยกส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนออกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการถอดลายน้ำ

การแปลงเวฟเลตจะมีลักษณะคล้ายกับขบวนการของ Octave filter bank เนื่องจากการพิจารณาสัญญาณผ่าน Window function ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในอัตราครึ่งละสองเท่าซึ่งเปรียบเสมือนกับการนำสัญญาณอินพุตผ่านวงจรกรองความถี่ที่มีแบนวิธที่มีอัตราลดลงสองเท่าเหมือนกับแบนวิธของ Window function ในขณะนั้น ดังนั้นจึงสามารถนำหลักการของ Filter bank มาใช้ในการสร้างการแปลงเวฟเลตในทางปฏิบัติได้

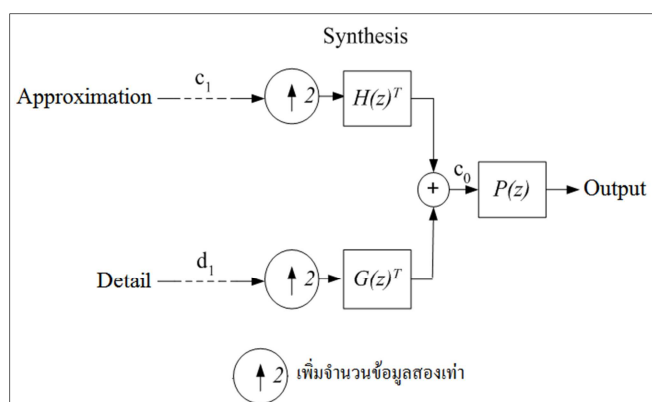
ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel filter bank) เป็นการแยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองส่วนโดยแบ่งเป็นส่วนความถี่ต่ำและส่วนความถี่สูงฟิลเตอร์แบงก์ดังกล่าวจะ

ประกอบด้วยส่วนที่เป็น Lowpass filter: H และ Highpass filter: G ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel analysis filter bank) โดยที่ตัวกรองการกระจาย (Decomposition) ความถี่ต่ำและความถี่สูงคือ H และ G ซึ่งมี Impulse response เป็น $h(k)$ และ $g(h)$ ตามลำดับ

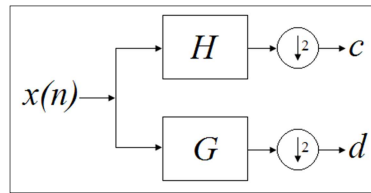


รูปที่ 2.7 Two channel analysis filter banks

สำหรับการสร้างกลับ (Reconstruction) จะมีโครงสร้างที่กลับกันกับโครงสร้างของการสังเคราะห์การสร้างกลับฟิลเตอร์แบบสองช่องสัญญาณ (Two channel synthesis filter bank) แสดงในรูปที่ 2.8 ตัวกรองการสร้างกลับคือ H และ G โดยที่ตัวกรองการกระจายกับตัวกรองการสร้างกลับจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เรียกว่า Quadrature mirror filters (QMF)



รูปที่ 2.8 Two channel synthesis filter banks



รูปที่ 2.9 Two channel analysis filter bank

การใช้ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณในการวิเคราะห์สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีสมการในการวิเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณดังนี้

$$c(k) = \sum_k h(2k - n)x(m) \quad (2.1)$$

$$d(k) = \sum_k g(2k - n)x(m) \quad (2.2)$$

โดยที่ $c(k)$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตขององค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximation)
 $d(k)$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตขององค์ประกอบความถี่สูง (Detail)

ลักษณะของการวิเคราะห์สัญญาณด้วย Octave analysis filter banks จะเป็นโครงสร้างแบบต้นไม้ (Tree structure) ซึ่งเป็นการนำ Two channel filter banks มาต่อเรียงกันโดยใช้สัญญาณเข้าที่พุดในส่วนที่เป็นความถี่ต่ำมาทำการแยกแบนด์ความถี่ออกอีกครั้งหนึ่งในกรณีทำการแปลงเวฟเลตซ้ำในแนวของ Lowpass จะเป็นลักษณะของ Dyadic tree structure ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งโครงสร้างในรูปนี้จะเป็นการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีทอัลกอริทึมนี้เรียกว่า Pyramidal algorithm โดยมีสมการในการวิเคราะห์ของการแปลงเวฟเลต J ระดับดังนี้

$$f(t) = \sum_n c_{0,n} \phi(t - n) \quad (2.3)$$

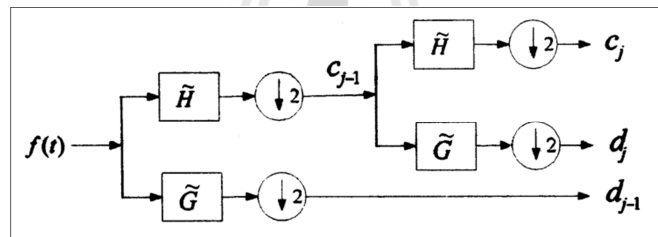
$$f(t) = \sum_k c_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2.4)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ $c_{j,k}$ และ $d_{j,k}$ ที่ระดับความละเอียด j จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ $c_{j-1,k}$ ที่ระดับความละเอียด $j-1$ ตามสมการต่อไปนี้

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,k} h(n-2k) \quad (2.5)$$

$$d_{j,k} = \sum_n c_{j-1,k} g(n-2k) \quad (2.6)$$

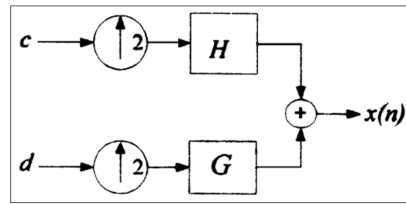
สำหรับ $j = 1, 2, \dots, J$ เมื่อ $c_{j,k}$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตขององค์ประกอบความถี่ต่ำที่แบนด์ย่อยที่ j และ $d_{j,k}$ คือสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตขององค์ประกอบความถี่สูงที่แบนด์ย่อยที่ j และจำนวนระดับในการแปลงเวฟเลตจะขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2.10 Octave analysis filter banks

การแปลงเวฟเลตแบบดิสครีตเป็นการแตกกระจาย (Decomposition) สัญญาณหรือการโปรเจกต์สัญญาณลงในสเปซของ V_j และ W_j ซึ่งทำให้รายละเอียดของสัญญาณลดลงดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น $f(t)$ จากระดับ j ไปเป็นระดับ $j-1$ วิธีการดังกล่าวนี้จะเหมือนกับขบวนการ Two channel synthesis filter banks ซึ่งเป็นการหาค่าของ $x(n)$ จากค่า c และ d ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11 โดยมีสมการในการสังเคราะห์ดังนี้

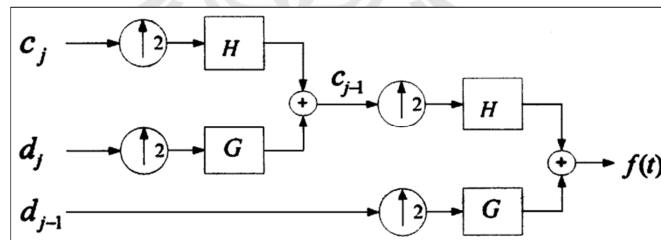
$$x(n) = \sum_m c(m)h(n-2m) + \sum_m d(m)g(n-2m) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.11 Octave synthesis filter banks 2 channel

การสร้างกลับโดยใช้การสังเคราะห์ฟิลเตอร์แบงก์แบบสองช่องสัญญาณแบบหลายแบนด์ย่อยแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งลักษณะของ Dyadic tree structure ซึ่งจะเป็นการรวมสัมประสิทธิ์ของสเกลลิงและสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตที่ระดับ Coarse resolution เข้าด้วยกันเพื่อสร้างกลับเป็นสัญญาณต้นแบบและเนื่องจากฟังก์ชันเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็น Orthonormal ดังนั้นจะได้สมการในการสร้างกลับหรือการสังเคราะห์ดังนี้

$$c_{j-1,k} = \sum_n c_{j,n} h(k-2n) + \sum_n d_{j,k} g(k-2n) \quad (2.8)$$

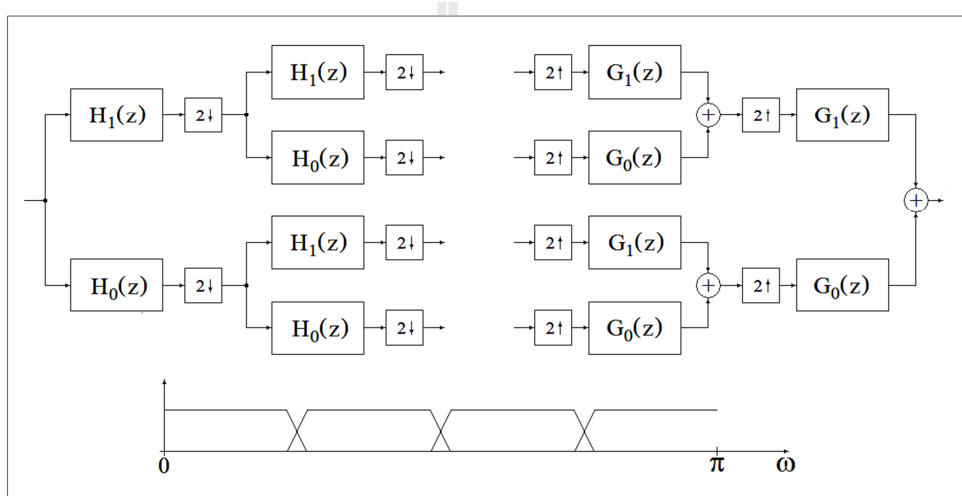


รูปที่ 2.12 Octave synthesis filter banks 3 channel

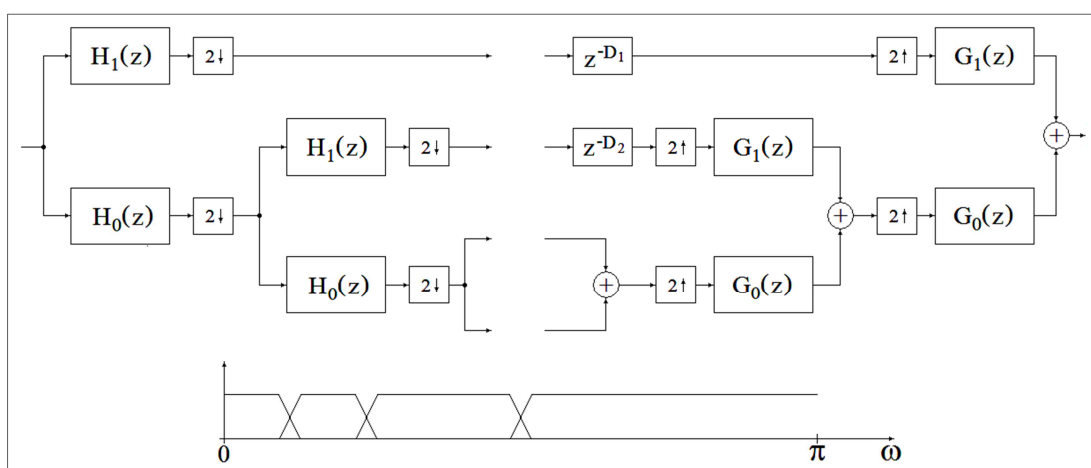
การสร้างกลับนี้จะมีการทำซ้ำไปเรื่อยๆ (Recursively) ที่ระดับจนกระทั่งถึงระดับเริ่มต้น นั่นคือจะได้สัญญาณต้นแบบกลับคืนมาขบวนการนี้เรียกว่าการแปลงกลับเวฟเลต (Inverse discrete wavelet transform: IDWT) ด้วยหลักการของฟิลเตอร์แบงก์จากกระบวนการแปลงเวฟเลตและการแปลงกลับเวฟเลตจะสังเกตได้ว่าสัญญาณเข้าที่ทุกที่ได้จากการแปลงกลับจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับสัญญาณอินพุตของการแปลงเวฟเลตโดยที่รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จะเป็นในลักษณะการสร้างกลับอย่างสมบูรณ์ของฟิลเตอร์แบงก์ (Perfectly reconstruction filter banks) เมื่อตัวกรองสัญญาณ H และ G เป็นกรณีของ Orthonormal wavelets หรือ Orthonormal

filter banks เท่านั้นเพื่อให้การแยกองค์ประกอบย่อยดังกล่าวสามารถทำการสร้างกลับอย่างสมบูรณ์ (Perfect reconstruction)

ในการสังเคราะห์ย่านความถี่ที่มากขึ้น สามารถที่ใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องสร้างเป็น โครงสร้างแบบต้นไม้ เพื่อให้สามารถแยกแยะย่านความถี่ออกเพิ่มขึ้นได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการ นำเอาฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องมาทำการสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่ำและสูงเพื่อแยกกลุ่มข้อมูล เพิ่มออกเป็น 4 ย่านความถี่ และถ้าต้องการสังเคราะห์ย่านความถี่อื่น ก็สามารถนำเอาฟิลเตอร์ แบงก์ 2 ช่องทำเป็น โครงสร้างแบบต้นไม้ ได้อีกหลายรูปแบบดังเช่นในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องเพื่อสังเคราะห์กลุ่มข้อมูลออกเป็น 4 ย่านความถี่



รูปที่ 2.14 การใช้ฟิลเตอร์แบงก์ 2 ช่องโครงสร้างแบบต้นไม้สังเคราะห์กลุ่มย่านความถี่ต่าง ๆ

2.5 การทดสอบลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในแต่ละรูปแบบ มีความต้องการที่แตกต่างกันตามรูปแบบของการประยุกต์งานในแต่ละด้าน ซึ่งตามมาตรฐานของ International federation of the phonographic industry (IFPI) ได้กำหนดมาตรฐานไว้คือ คุณภาพของสัญญาณลายน้ำกับความจุของสัญญาณลายน้ำ ซึ่งเป็นการหาค่าความเร็วในการส่งข้อมูลลายน้ำเข้าไปในสัญญาณเสียงเมื่อเทียบกับเวลาในการเล่นสัญญาณเสียงนั้น มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (Bit per second: bps) โดยค่าของความจุของสัญญาณลายน้ำจะขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำลายน้ำแต่ละรูปแบบแตกต่างกันไป ทั้งนี้ค่าความจุที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 20 bps ตามมาตรฐานของ IFPI และนอกเหนือจากมาตรฐานของ IFPI ยังมีสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ ประสิทธิภาพของสัญญาณลายน้ำต่อการโจมตีด้วยรูปแบบต่างๆ เช่นการโจมตีด้วยสัญญาณรบกวน (Noise attacks) การโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter attacks) การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter attacks) การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter attacks) และการโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลแบบ MP3 (MP3 compression attacks) เป็นต้น

การทดสอบคุณภาพของลายน้ำโดยการปรับเปลี่ยนค่าระดับความเข้มในการฝังลายน้ำ เพื่อให้ทราบถึงระดับของผลกระทบที่มีต่อสัญญาณเสียงเดิม จะสามารถทดสอบได้ด้วยค่า SNR หรือ Signal-to-Noise ratio ซึ่งค่า SNR จะสามารถแสดงถึงคุณภาพของสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม โดยจะแสดงค่าออกมาอยู่ในรูปของ dB หรือ Decibel ทั้งนี้ตามมาตรฐานการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่กำหนดขึ้นโดย IFPI ได้กำหนดไว้ว่าการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องมีค่า SNR มากกว่า 20 dB

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^k X(i)^2}{\sum_{i=1}^k [X(i) - X''(i)]^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ $X(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ
 $X''(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำ

การทดสอบความถูกต้องของข้อมูลลายน้ำที่ถอดออกมาได้ โดยทั่วไปแล้วค่าที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องนั้นจะปรากฏออกมาหลายค่าขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการนำไปใช้ เช่น

Normalized correlation (NC) เป็นการเปรียบเทียบระดับพลังงานของข้อมูลลายน้ำ ดัชนีกับข้อมูลลายน้ำที่ถอดได้ตามสมการที่ 4 ซึ่งเหมาะสำหรับลายน้ำที่ไม่ใช่ภาพแบบไบนารี

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega(i, j) \omega'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \omega'(i, j)^2}} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\omega(i, j)$ คือ ข้อมูลภาพลายน้ำต้นฉบับ

$\omega'(i, j)$ คือ ข้อมูลภาพลายน้ำที่ถอดได้

นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่สามารถทดสอบความถูกต้องของลายน้ำได้อย่างชัดเจน คือ Bit error ratio (BER) เป็นการทดสอบความผิดพลาดในแต่ละบิต เทียบเป็นร้อยละของจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดตามสมการที่ 5 ซึ่งเหมาะสำหรับลายน้ำที่เป็นภาพแบบไบนารี

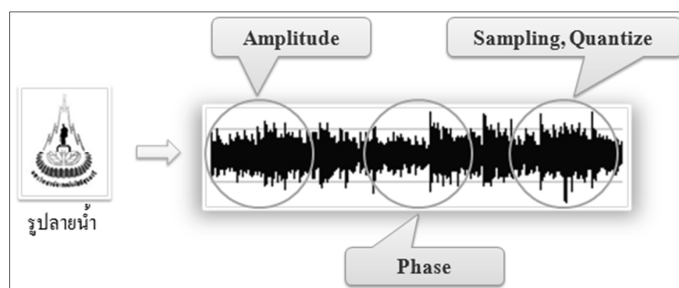
$$BER = \frac{\text{Error bits}}{\text{All bits}} \times 100\% \quad (2.11)$$

โดยที่ Error bits คือ จำนวนข้อมูลบิตลายน้ำที่ผิดพลาด

All bits คือ จำนวนข้อมูลบิตลายน้ำทั้งหมด

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผ่านมานั้น ได้ใช้เทคนิคการฝังลายน้ำแตกต่างกันไป โดยทั่วไปจะอาศัยองค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล เช่นปรับเปลี่ยนระดับ Amplitude ของสัญญาณปรับเปลี่ยน Phase ของสัญญาณหรือปรับเปลี่ยนการ Sampling และ Quantization ของข้อมูล



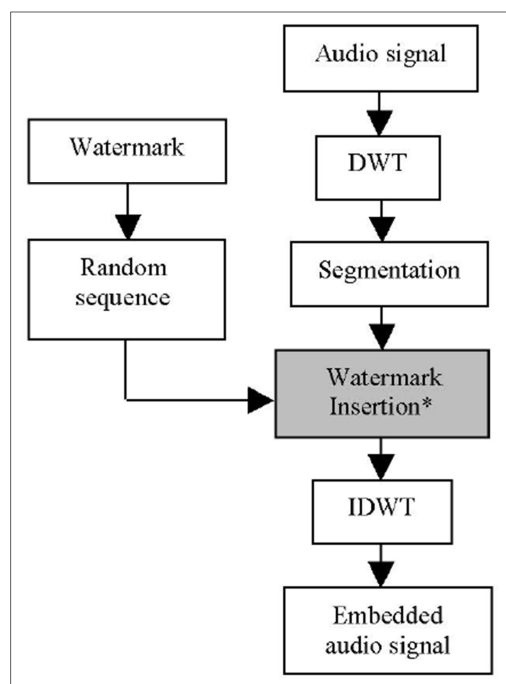
รูปที่ 2.15 องค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิทัล

- Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques

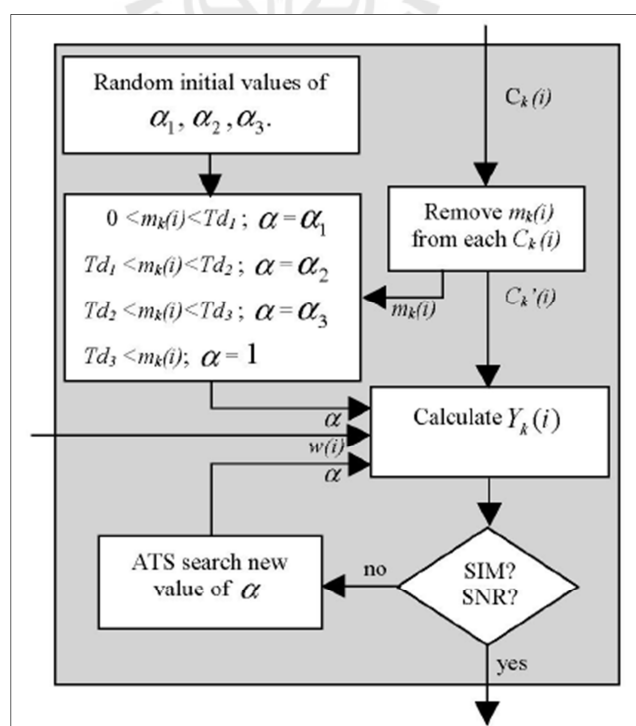
งานวิจัยนี้เสนอหลักการฝังลายน้ำโดยการปรับเปลี่ยน Phase ของสัญญาณ โดยผู้วิจัยคือ Akira Takahashi, Ryouichi, Nishimura, Yoiti Suzuki [1] ซึ่งใช้วิธีการ Transform ผ่าน Transfer Function ที่มีผลเฉพาะกับ Phase ของสัญญาณเท่านั้น ทั้งนี้การถอดสัญญาณลายน้ำจำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับมาเปรียบเทียบกับ Phase ของสัญญาณที่เปลี่ยนไปเพื่อให้ได้ลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ออกมานั่นเอง

- Wavelet-Based Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search

งานวิจัยนี้จัดทำโดย N. Sriyingyong และ K. Attakitmongkol [3] งานวิจัยนี้ฝังลายน้ำใน Spatial Domain ใช้เทคนิคการแปลง DWT หรือ Discrete wavelet transform เพื่อกรองเอาส่วนของเนื้อหาข้อมูลมาทำการฝังลายน้ำลายน้ำที่ใช้เป็นข้อมูลรูปภาพมีขนาด 25X25 Pixels และก่อนที่จะทำการฝังลายน้ำได้มีการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลฐาน เพื่อใช้ในการกำหนดระดับการฝังตัวหรือปรับค่า Alpha ให้เหมาะสมก่อนฝังลายน้ำดังอัลกอริทึมในรูปที่ 2.16 และในส่วนของการตรวจจับลายน้ำจะใช้วิธีการของ Adaptive Tabu Search (ATS) มาใช้เพื่อค้นหาสัญญาณลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ ซึ่งวิธีนี้จะทำการค้นหาคำตอบโดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลต้นฉบับแต่จะใช้เวลาในการค้นหามาก



รูปที่ 2.16 อัลกอริทึมหลักการฝังลายน้ำดิจิทัลแบบ Adaptive Tabu Search



รูปที่ 2.17 การหาค่าเฉลี่ยเพื่อปรับค่า Alpha แบบ Adaptive Tabu Search

- DWT-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization

เป็นงานวิจัยของ Liu Hai-yan, ZhengXue-feng, Wang Ying [4] ได้นำเสนอเทคนิคการฝังลายน้ำใน Spatial Domain โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าระดับ Amplitude เนื้อหาข้อมูลเมื่อผ่านการแปลงเวฟเล็ต 3 ระดับ การฝังลายน้ำจะฝังโดยอาศัยระดับค่าเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงระยะของการฝังลายน้ำ เป็นจุดตัดสินใจว่าเป็นข้อมูล บิต 1 หรือ บิต 0 โดยไม่จำเป็นต้องใช้ลายน้ำหรือข้อมูลต้นฉบับมาใช้ในกระบวนการถอดลายน้ำ ทั้งนี้การฝังลายน้ำจะฝังไปในแต่ละจุดของข้อมูลต่อ 1 จุด Pixels ของภาพลายน้ำ แต่วิธีการของงานวิจัยชิ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อความผิดเพี้ยนของข้อมูลอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้จาก ค่า SNR เมื่อฝังลายน้ำแล้ว มีค่าเท่ากับ 23.342dB ถึงแม้มาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) ได้กำหนดไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 20 dB แต่เนื่องจากความเป็นจริง ค่า SNR ที่ 23.342dB จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในระดับที่มนุษย์เรารับรู้ได้

- An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain

นำเสนอโดย Wang Lanxun, Yin Chao, Pang Jiao [5] ได้เสนอการแทรกลายน้ำ โดยการปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ย Quantization ของกลุ่มข้อมูลที่จะฝังลายน้ำลงไป ซึ่งวิธีนี้จะใช้การเปลี่ยนแปลงของระดับค่าเฉลี่ย Quantization มาเป็นจุดตัดสินใจว่าเป็นข้อมูลลายน้ำ บิต 1 หรือ บิต 0 งานวิจัยชิ้นนี้จึงทำให้ค่าของ SNR มีค่าสูงหรือในอีกแง่คือ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยมาก แต่ทั้งนี้ไม่เหมาะกับงานที่จะต้องถูกโจมตีจากการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (ADC และ DAC Conversion) เพราะการโจมตีในรูปแบบนี้จะมีการทำ Sampling และ Quantization ใหม่ทุกครั้งที่ผ่านมากระบวนการแปลงสัญญาณดังกล่าว

2.7 สรุป

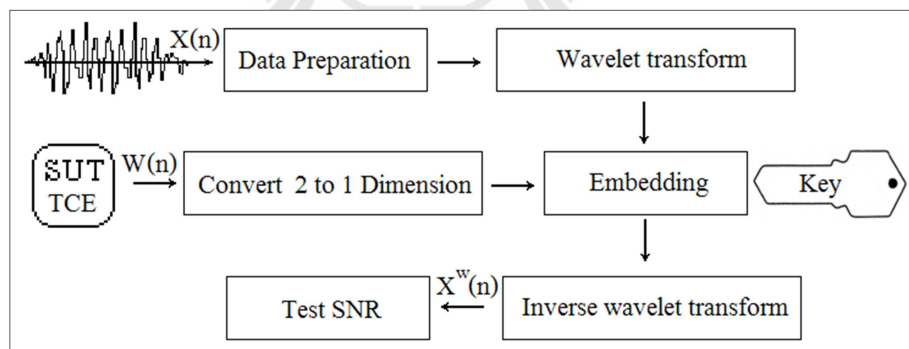
จากทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่า การทำลายน้ำสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้คุณภาพที่ได้ใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงต้นฉบับมากที่สุด ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของข้อมูลสัญญาณเสียงที่จะนำมาสร้างคำหนิในการทำลายน้ำ อีกทั้งยังสามารถทำให้คุณภาพของสัญญาณลายน้ำดีขึ้นได้โดยการทำลายน้ำในโดเมนอื่น ซึ่งอาศัยกระบวนการแปลงเวฟเล็ตแบบบิสคริต เพื่อช่วยให้สามารถคัดแยกกลุ่มย่านความถี่ที่ต้องการฝังลายน้ำ ทั้งนี้คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขตามมาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) นอกจากนี้แล้วสัญญาณลายน้ำดิจิทัลจะต้องมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะเป้าหมายในการพัฒนาลายน้ำที่ได้กำหนดไว้

บทที่ 3

การทำลายน้ำโดยเทียบค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลต

3.1 บทนำ

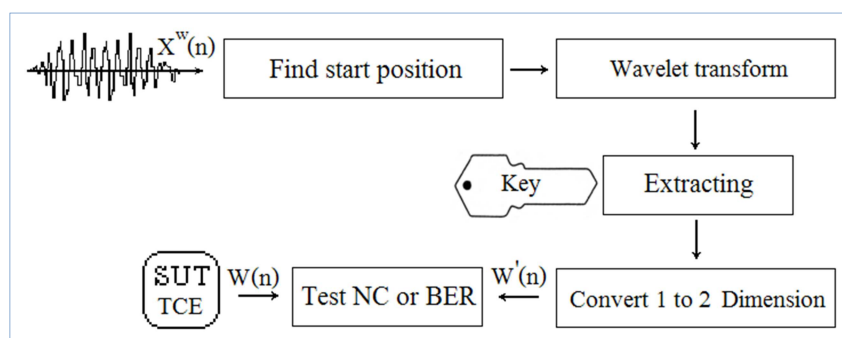
การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลเป้าหมายเพื่อให้ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสัญญาณระหว่างดิจิทัลและแอนะล็อก เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของการฝังลายน้ำในองค์ประกอบต่างๆ ของข้อมูลสัญญาณเสียง เทคนิคที่ใช้ทำลายน้ำควรเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขในส่วนของคุณค่าสัญญาณเสียงหรือแอมพลิจูด (Amplitude) เนื่องจากการฝังลายน้ำแบบนี้จะมีความคงทนต่อการโจมตีที่รุนแรงได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการเปลี่ยนสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกจะมีการเข้ารหัสและถอดรหัสระหว่างข้อมูลแบบ PCM (Pulse code modulation) กับสัญญาณเสียงแอนะล็อก ซึ่งองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่คงสภาพอยู่ควรจะเป็นแอมพลิจูดของสัญญาณ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของสัญญาณเสียง และในส่วนของ การถอดลายน้ำก็สามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีอื่น แต่ข้อเสียที่ทำให้วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมก็เนื่องจากเกิดผลทำให้สัญญาณเสียงผิดเพี้ยนไปจากเดิมเป็นอย่างมาก จึงต้องนำวิธีการแปลงเวฟเลตมาใช้เพื่อเลือกกลุ่มของย่านความถี่ในการฝังลายน้ำ เพื่อให้ลายน้ำสัญญาณเสียงที่ได้มีค่าความผิดเพี้ยนไปจากต้นฉบับน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 การฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

การฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนแรกทำการแบ่งข้อมูลสัญญาณเสียงออกช่วงเท่าๆ กัน ก่อนเข้าสู่การแปลงเวฟเลต ส่วนภาพลายน้ำจะทำการจัดข้อมูลจาก 2 มิติให้เป็น 1 มิติ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการฝังกับสัญญาณเสียงที่ผ่านการ

แปลงเวฟเลตและทำการแปลงกลับเวฟเลตเป็นการเสร็จสิ้นการทำลายน้ำ ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการทดสอบคุณภาพสัญญาณเสียงจากการทำลายน้ำด้วยการคำนวณค่า SNR



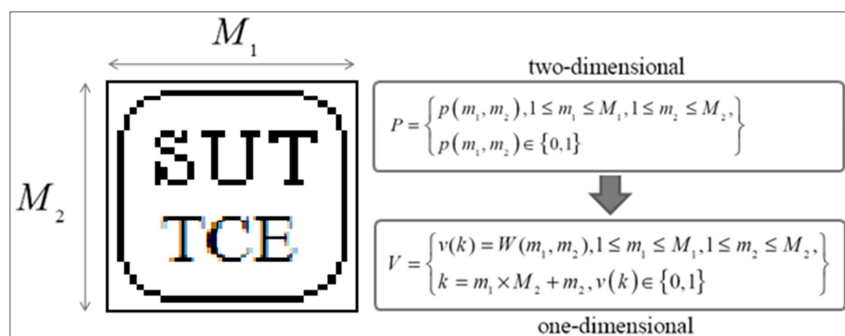
รูปที่ 3.2 การถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล

ในด้านการถอดลายน้ำ ต้องทำการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของลายน้ำที่ฝังอยู่ และนำเข้าสู่ขั้นตอนการแปลงเวฟเลตก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการถอดลายน้ำ เมื่อได้ข้อมูลภาพลายน้ำที่ถอดมา นำเข้าสู่ขั้นตอนการแปลงข้อมูลจากข้อมูล 1 มิติเป็น 2 มิติ สุดท้ายทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับภาพลายน้ำต้นฉบับด้วยค่าของ NC หรือ BER เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ว่าตรงกับลายน้ำที่เจ้าของลิขสิทธิ์มีอยู่หรือไม่

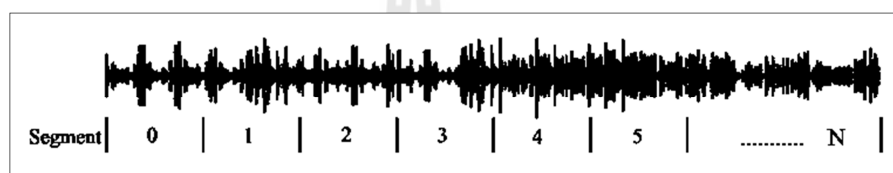
3.2 การเตรียมข้อมูลก่อนทำลายน้ำดิจิทัล

ก่อนการทำลายน้ำตามวิธีการที่ได้ออกแบบขึ้น การเตรียมข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สำคัญ โดยเฉพาะการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ภาพลายน้ำที่ใช้โดยส่วนมากเป็นข้อมูลภาพ Binary ที่มีข้อมูลเป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งการทำลายน้ำบนสัญญาณเสียงจะต้องเปลี่ยนข้อมูลภาพ 2 มิติ ให้เป็นข้อมูล 1 มิติดังรูปที่ 3.3 ขนาดของข้อมูลภาพที่ได้จะมีความยาวของข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น $M_1 \times M_2$

ส่วนทางด้านข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ อาจจะเป็นข้อมูลของเพลงทั้งเพลง ซึ่งจะมีความยาวหรือจำนวนข้อมูลที่มาก ดังนั้นกระบวนการจึงต้องตัดข้อมูลออกเป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในแต่ละส่วนของข้อมูลที่แบ่งออกมานั้น จะใช้ฝังลายน้ำเพียง 1 จุดหรือ 1 Pixel ของภาพลายน้ำที่ใช้ฝัง

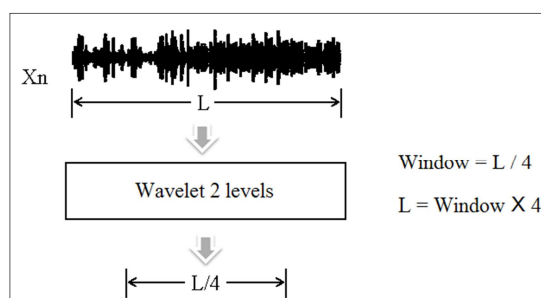


รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนภาพลายน้ำ 2 มิติ เป็นข้อมูล 1 มิติ



รูปที่ 3.4 การแบ่งส่วนข้อมูลก่อนการฝังลายน้ำ

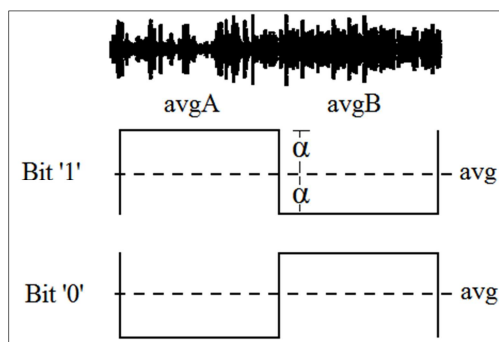
เมื่อพิจารณาเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงเวฟเลตถึง 2 ระดับ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel ได้โดย ถ้ากำหนดให้ L เป็นขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel และการแปลงเวฟเลตจะทำให้ขนาดของ Sampling ข้อมูลลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้น เมื่อผ่านการแปลงเวฟเลต 2 ระดับจะทำให้จำนวนข้อมูลลดลง 4 เท่า ซึ่งขนาดของข้อมูลที่ได้หลังจากการแปลงเวฟเลตแล้วจะเรียกว่า หน้าต่าง (Window) ซึ่งขนาดของหน้าต่างสามารถหาได้จากการทดลองเพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมในการทำลายน้ำนั่นเอง



รูปที่ 3.5 ขนาดของข้อมูลที่ใช้ในการฝังลายน้ำ 1 Pixel

3.3 เทคนิคการฝังและถอดลายน้้าสัญญาณเสียงดิจิทัล

เทคนิคที่ใช้ในการฝังลายน้้าสัญญาณเสียงดิจิทัล จะทำการแบบกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มด้วยขนาดที่เท่ากัน และทำการปรับค่าเฉลี่ยทางขนาด (Amplitude) ของสัญญาณทั้งสองกลุ่มให้เท่ากัน ก่อนที่จะปรับระดับสัญญาณตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ตามเงื่อนไข

กรณีข้อมูลลายน้้าเป็นบิต '1'

$$X'(n) = X(n) \times \alpha ; n = 1, 2, 3 \dots, G/2 \quad (3.1)$$

$$X'(n) = X(n) / \alpha ; n = G/2 + 1, \dots, G \quad (3.2)$$

กรณีข้อมูลลายน้้าเป็นบิต '0'

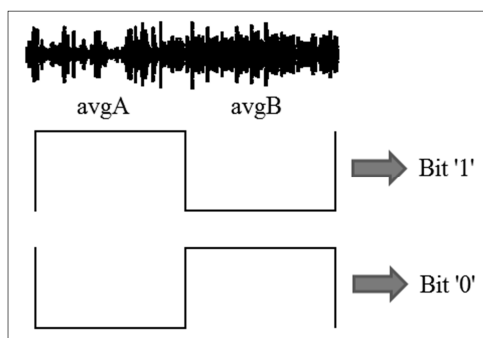
$$X'(n) = X(n) / \alpha ; n = 1, 2, 3 \dots, G/2 \quad (3.3)$$

$$X'(n) = X(n) \times \alpha ; n = G/2 + 1, \dots, G \quad (3.4)$$

โดยที่ G คือ ขนาดของหน้าต่างที่ใช้ฝังลายน้้า 1 Pixel

α คือ ระดับความเข้มหรือความแรงในการฝังลายน้้า (Watermark strength)

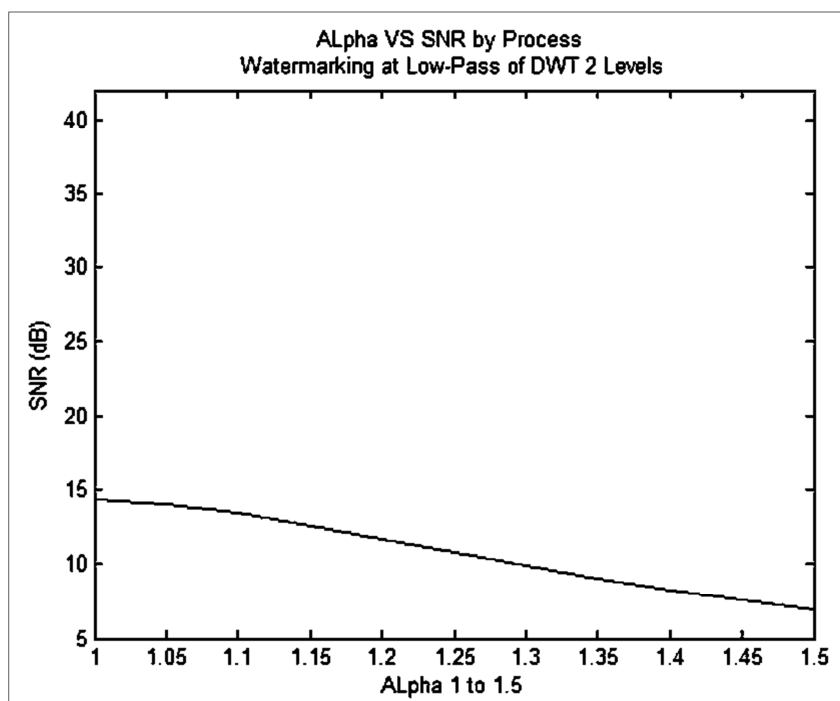
ส่วนกระบวนการถอดสัญญาณลายน้ำ ไม่ต้องใช้ข้อมูลเสียงหรือลายน้ำต้นฉบับ เนื่องจากสามารถตัดสินใจได้จากระดับของค่าเฉลี่ยกลุ่มข้อมูลสองกลุ่ม ดังรูปที่ 3.7



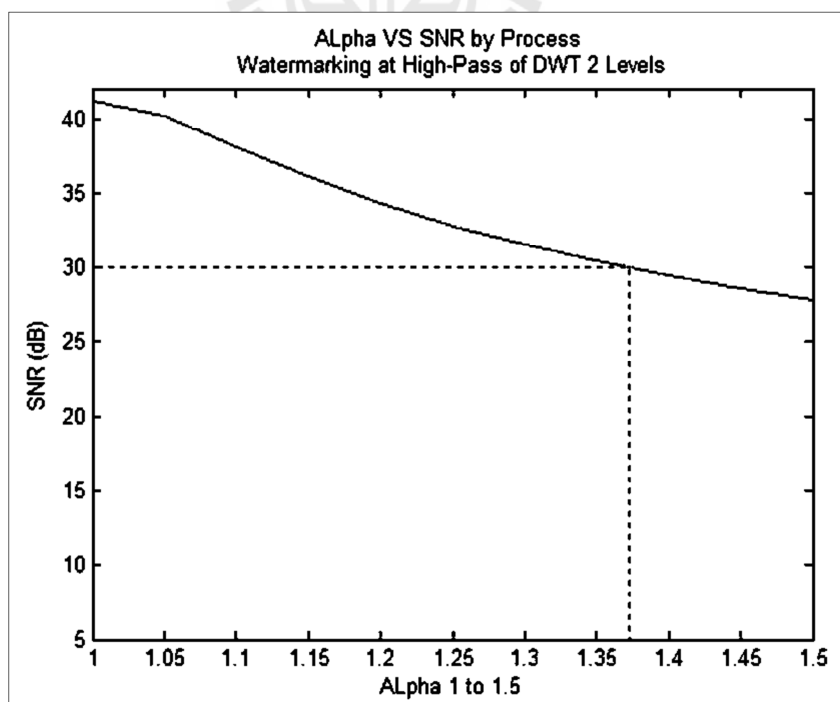
รูปที่ 3.7 การตัดสินใจค่าเฉลี่ยข้อมูลทั้งสองกลุ่ม เป็น บิต '1' หรือ บิต '0'

3.4 การทดลองฝังลายน้ำในกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่าง ๆ

หลักการทำลายน้ำดิจิทัลในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ตั้งสมมติฐานการฝังลายน้ำไว้สองรูปแบบคือ ระหว่างกลุ่มข้อมูลย่านความถี่ต่ำและกลุ่มข้อมูลย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ โดยอาศัยการแปลงเวฟเล็ตแบบ Haar wavelet 1 มิติ 2 ระดับ ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ตแบบ Haar wavelet เป็นการแปลงเวฟเล็ตที่ง่ายที่สุดทำให้ขั้นตอนการฝังลายน้ำและในขั้นตอนการถอดมีการคำนวณได้อย่างรวดเร็วในการสังเคราะห์กลุ่มของข้อมูลในแต่ละย่านออกจากกันและเพื่อทราบถึงข้อดีข้อเสียในแต่ละวิธี จะใช้หลักการเปรียบเทียบคุณภาพของการทำลายน้ำในการฝังทั้งสองกลุ่มย่านความถี่ด้วยค่า SNR และใช้ขนาดของหน้าต่างเท่ากับ 64 จุดในการทดสอบ สัญญาณเสียงต้นฉบับที่ใช้เป็นข้อมูลเสียงแบบ PCM 16 bits 48 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงที่มีการเคลื่อนไหว (Dynamic) ของเสียงกว้าง เช่นเป็นเพลงที่มีจังหวะช้าและเร็วในเพลงเดียว และภาพลายน้ำที่ใช้ในการทดลองใช้ภาพในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.9 ผล SNR ต่อการฝังย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ



รูปที่ 3.10 ลายน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นภาพ Binary ขนาด 64 X64 Pixels

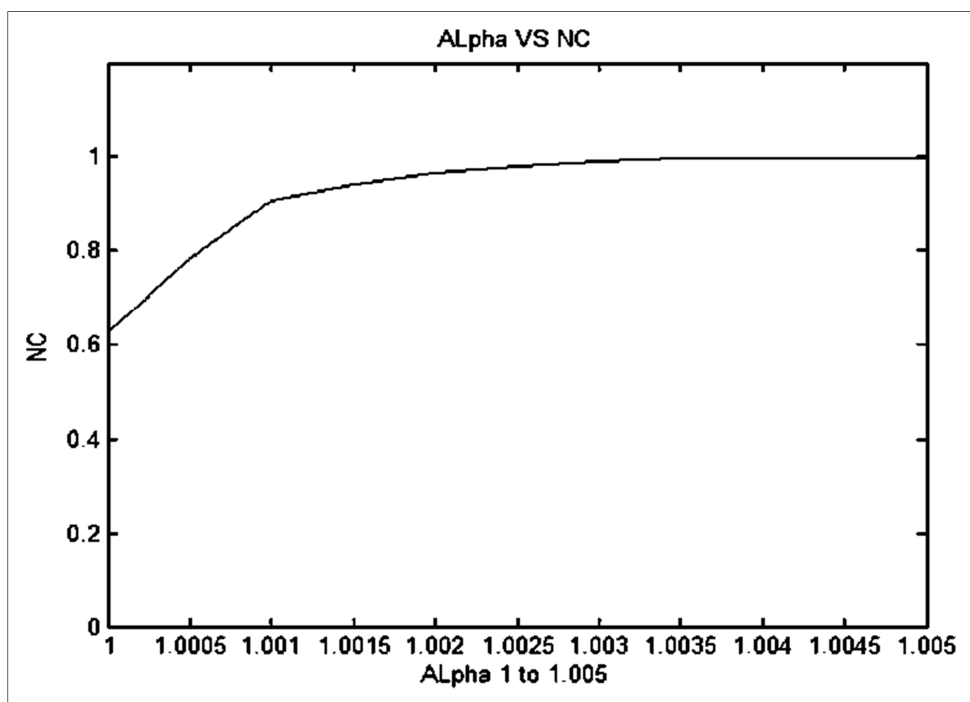
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การฝังลายน้ำในส่วนย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำของการแปลงเวฟเล็กระดับที่สอง จะให้ผลของค่า SNR ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับการฝังทางด้านความถี่ต่ำ ที่แม้กระทั่งในขณะ Alpha มีค่าเท่ากับ 1 หรือ ไม่มีการฝังลายน้ำ ค่า SNR ยังมีค่าต่ำกว่า 15 dB ทั้งนี้เนื่องจาก การปรับค่าเฉลี่ยของช่วงข้อมูลทั้งสองกลุ่มให้เท่ากันก่อนปรับค่า Alpha และอีกกรณี คือกระบวนการฝังตัวได้ทำการปรับเปลี่ยนกลุ่มข้อมูลหลัก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ทางด้านความถี่ต่ำ ดังนั้นค่า SNR จึงมีค่าที่ต่ำมากกว่า SNR ทางย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ

นอกจากนี้ยังพบว่า การฝังในย่านความถี่ต่ำจะมีผลกระทบกับคุณภาพของลายน้ำที่ต่ำกว่า 20 dB ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของ IFPI ส่วนการฝังในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ จะพบว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างชัดเจน และเป็นไปตามมาตรฐานของ IFPI และงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้การฝังในระดับของ SNR อยู่ประมาณ 30 dB เนื่องจากการทดสอบโดยการฟังจะพบว่าถ้าฝังลายน้ำที่มีระดับความแรงมากไปกว่านี้จะทำให้รับรู้ถึงสัญญาณลายน้ำหรือรับรู้ถึงสัญญาณรบกวนในขณะฟังเสียงนั่นเอง

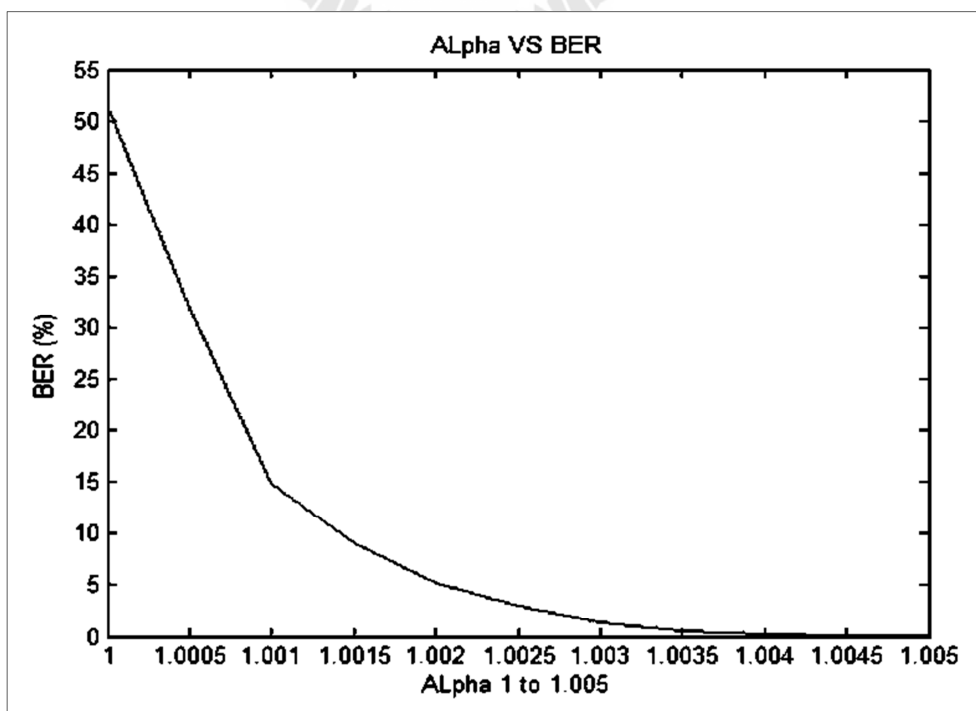
3.5 การปรับระดับความแรงของการฝังลายน้ำ

เพื่อค้นหาผลกระทบที่เกิดจากระดับการฝังตัวเทียบกับค่า NC และ BER ในกระบวนการทดลองนี้จะต้องมีขั้นตอนการถอดลายน้ำ เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ และนำภาพลายน้ำที่ได้มาเทียบกับ ภาพลายน้ำต้นฉบับ ตามสมการของ NC และ BER

จากผลการทดลองค่าของ NC และ BER มีระดับการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงของ Alpha เท่ากับ 1 ถึง 1.005 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นค่าที่น้อยมากเนื่องจากการทดลองไม่ได้ผ่านการโจมตีจึงทำให้การปรับค่า Alpha จึงไม่ค่อยมีผลต่อค่าของ NC และ BER และถ้าไม่อาศัยกระบวนการบันทึกข้อมูลเป็น Wave File ก่อน ค่าของ NC และ BER จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ผลที่ได้จึงปรากฏดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะเลือกมาเฉพาะค่า NC ที่น้อยที่สุด และ ค่าของ BER ที่มากที่สุดมาแสดงเท่านั้นเนื่องจากค่า Alpha ที่มากกว่านี้ค่าของ NC และ BER จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง



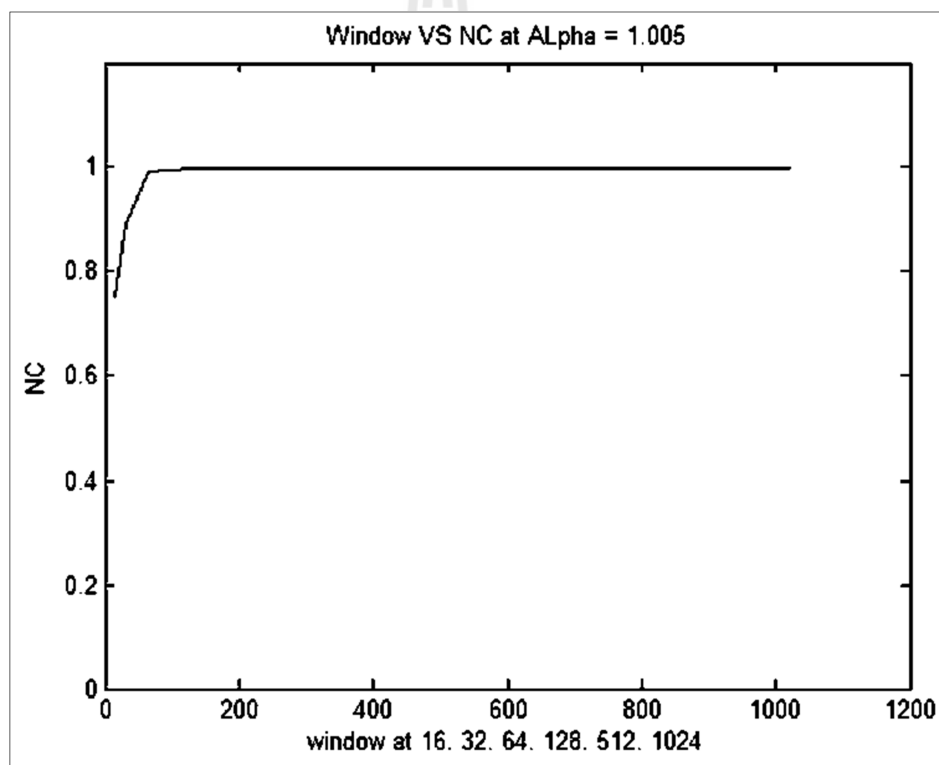
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า NC



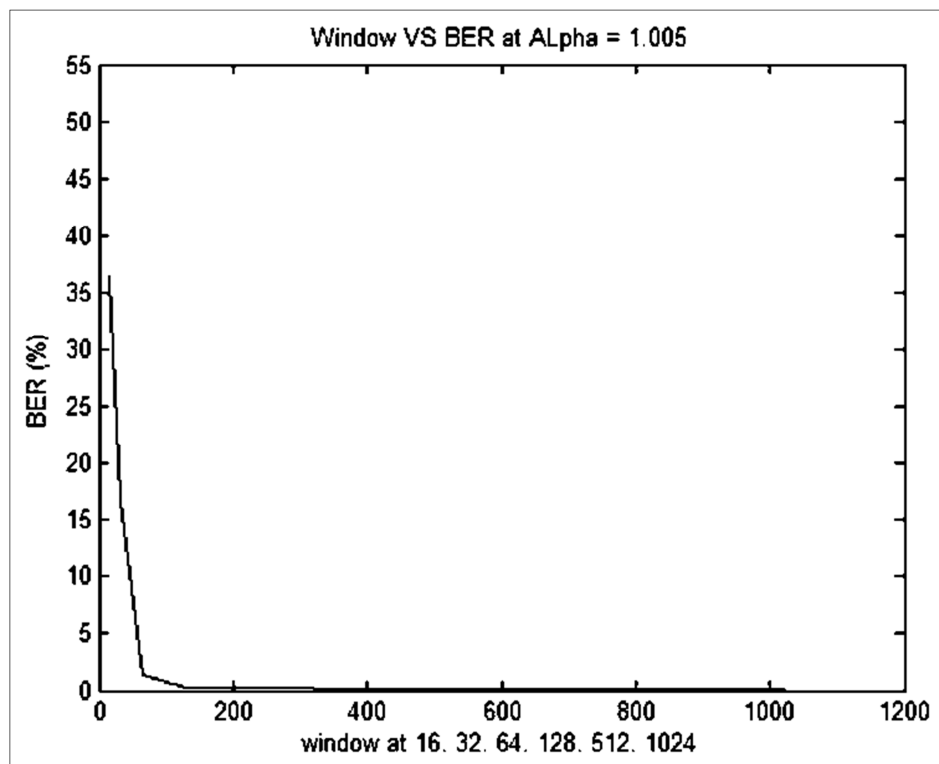
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Alpha เทียบกับค่า BER

3.6 การปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจ

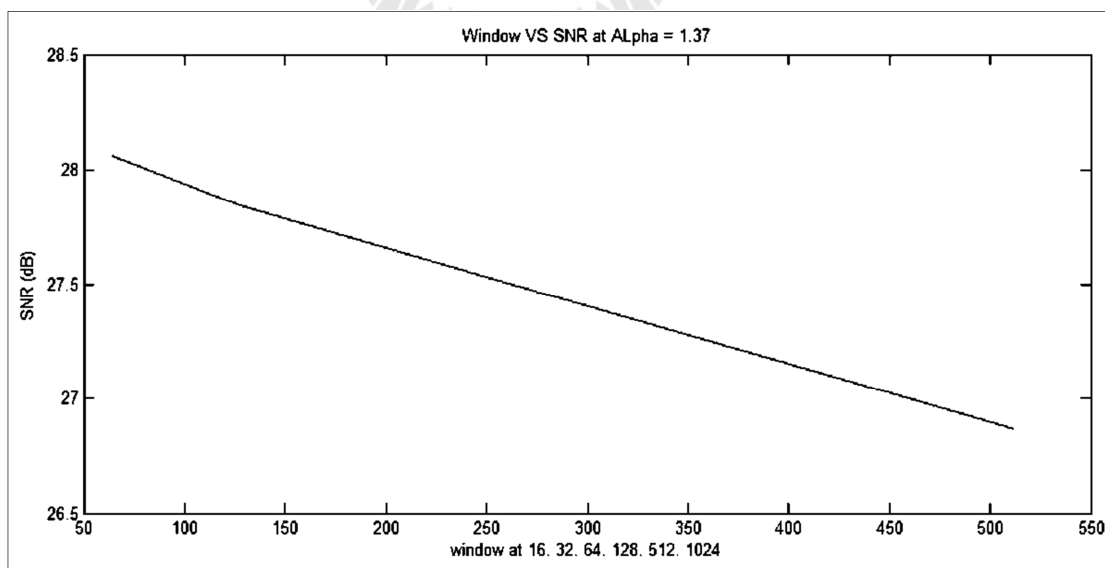
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.5 จะเลือกใช้ค่า Alpha ที่ 1.002 ซึ่งทำให้ $BER = 5.202\%$ และ $NC = 0.9679$ ที่ขนาดของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 128 จุด ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการปรับขนาดกลุ่มข้อมูลที่ใช้ตัดสินใจได้ชัดเจน เพราะในการทดลองการปรับขนาดของหน้าต่างมีผลกระทบต่อค่า NC และ BER น้อยมากและการปรับหน้าต่างจะสามารถปรับได้เป็นตัวเลขชุด 2 ยกกำลัง เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ด 2 ระดับ โดยการทดลองนี้ใช้หน้าต่างเท่ากับ 16, 32, 64, 128, 512 และ 1024 ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.14 ส่วนผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่า SNR เมื่อปรับขนาดหน้าต่างตามรูปที่ 3.15 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ทั้งนี้เมื่อเทียบกับค่า Alpha เท่ากับ 1.37 ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.4



รูปที่ 3.13 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า NC



รูปที่ 3.14 ผลการปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า BER

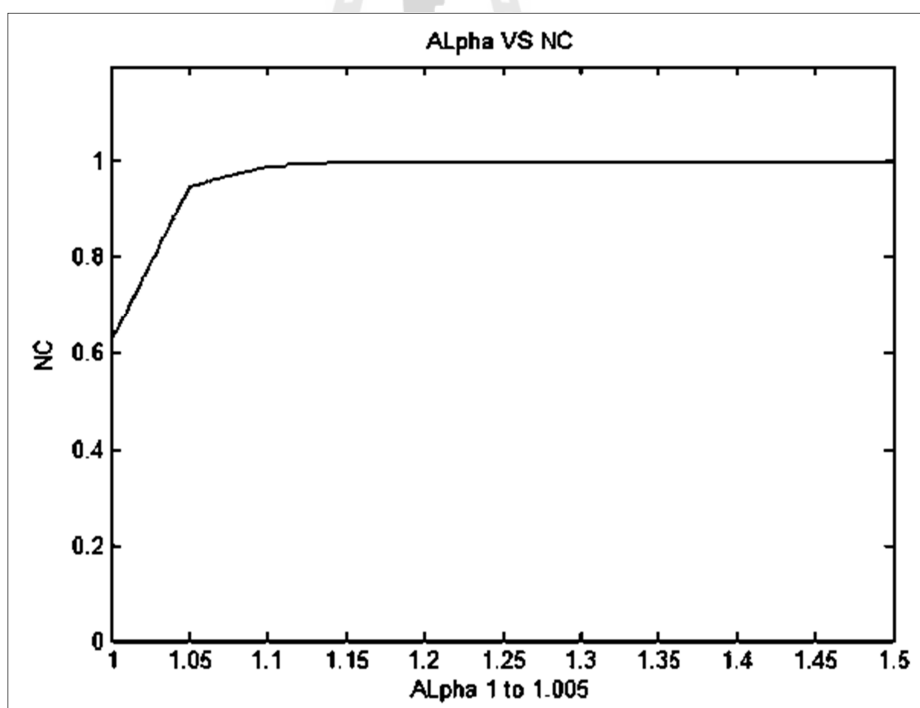


รูปที่ 3.15 การปรับขนาดหน้าต่างเทียบกับค่า SNR

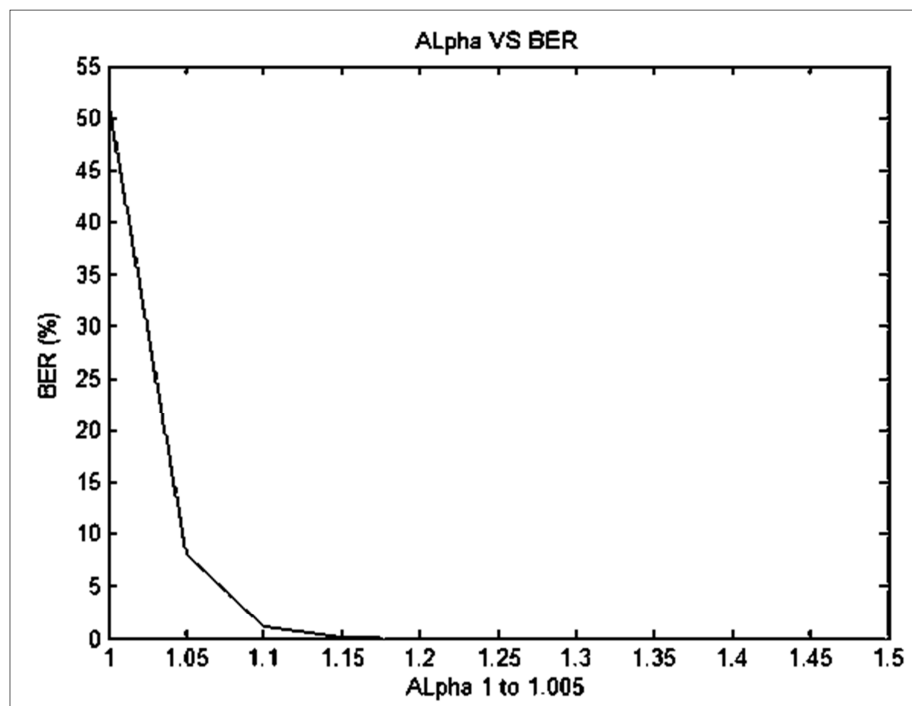
3.7 ความทนทานของลายน้ำต่อการโจมตีรูปแบบต่าง ๆ

การทดสอบลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่สำคัญนั้นก็คือ การทดสอบความทนทานเมื่อถูกระทบจากการโจมตีด้วยวิธีการต่างๆ ตามพื้นฐานงานวิจัยโดยทั่วไป ซึ่งมีการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่า Alpha ตั้งแต่ 1 ถึง 1.5 และ Window เท่ากับ 64 เทียบกับค่า NC และ BER เมื่อผ่านการโจมตีดังต่อไปนี้

- การโจมตีจากสัญญาณรบกวน (Noise attacks) ซึ่งในที่นี้มีการทดสอบโดยการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในข้อมูลเสียงที่ผ่านการฝังลายน้ำ ก่อนที่จะทำการถอดภาพลายน้ำออกมาเพื่อทดสอบค่า NC และ BER และเมื่อเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในข้อมูลเสียงที่ฝังลายน้ำ จะทำให้ค่าของ NC และ BER ลดลงตามระดับของสัญญาณรบกวน แต่เมื่อเพิ่มระดับการฝังลายน้ำเข้าไปจะทำให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้มากขึ้นเมื่อพิจารณาจะพบว่าตั้งแต่ระดับ Alpha มากกว่า 1.15 ขึ้นไปลายน้ำก็สามารถทนทานได้เป็นอย่างดี

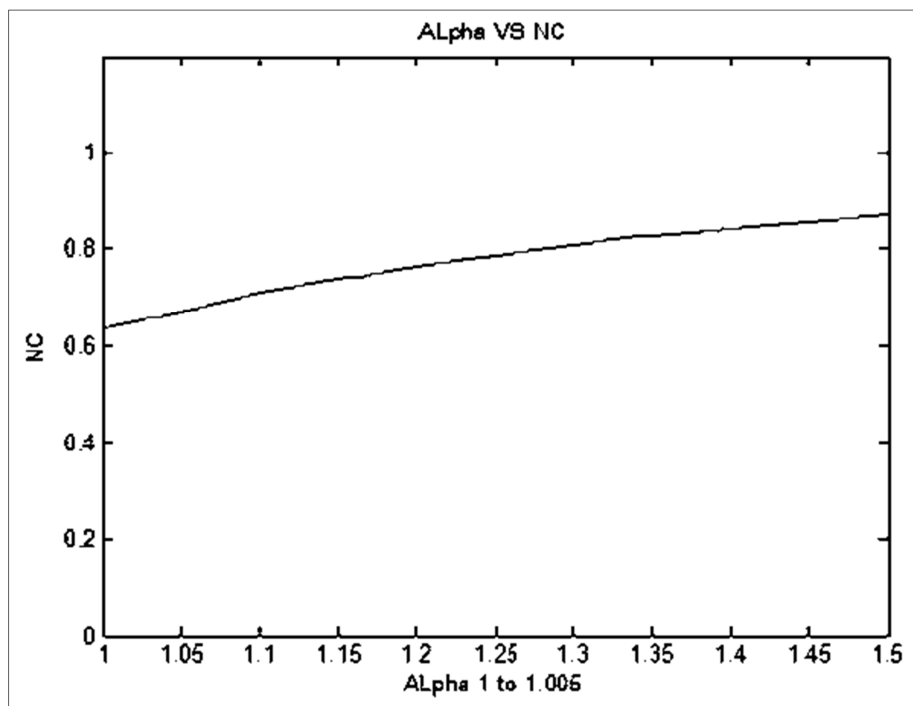


รูปที่ 3.16 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Noise Attacks

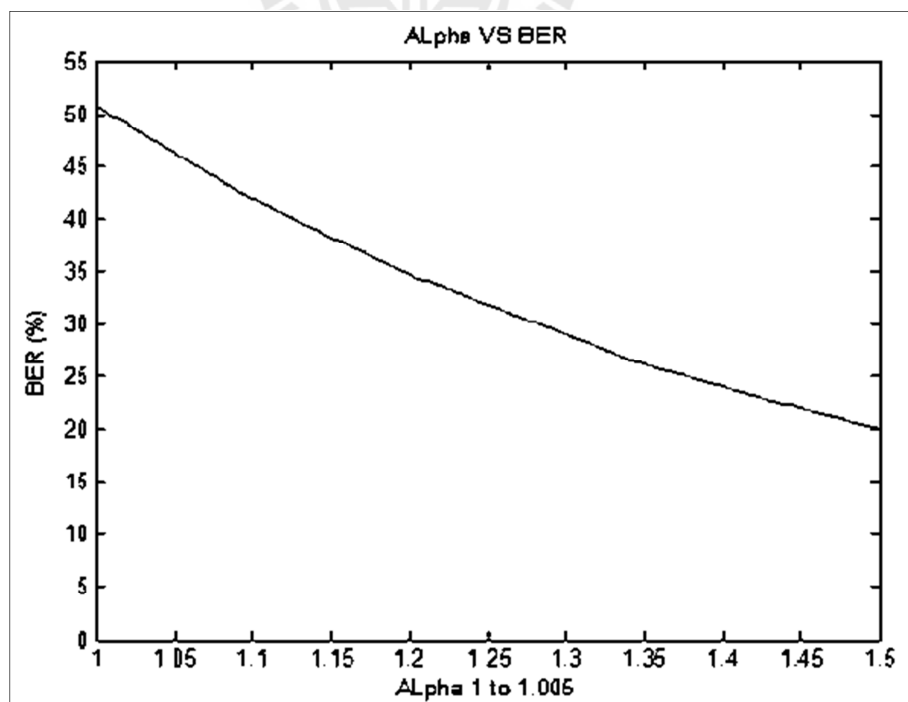


รูปที่ 3.17 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Noise Attacks

- การโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำ บันทึกเป็น Wave File และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่ต่ำตัดความถี่ที่ 300 Hz ที่ -15dB



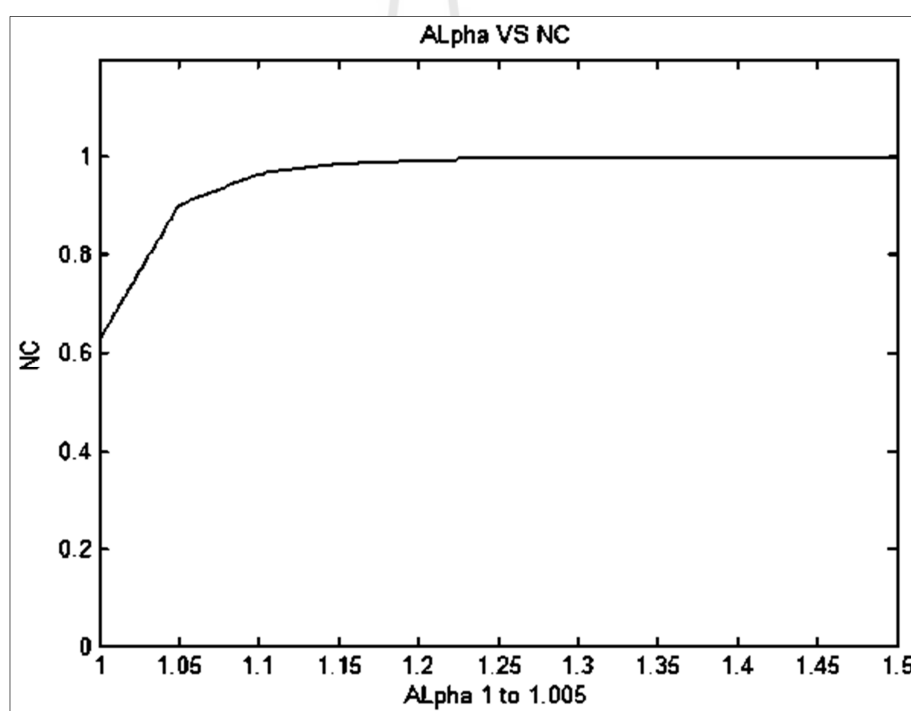
รูปที่ 3.18 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Low-pass filter



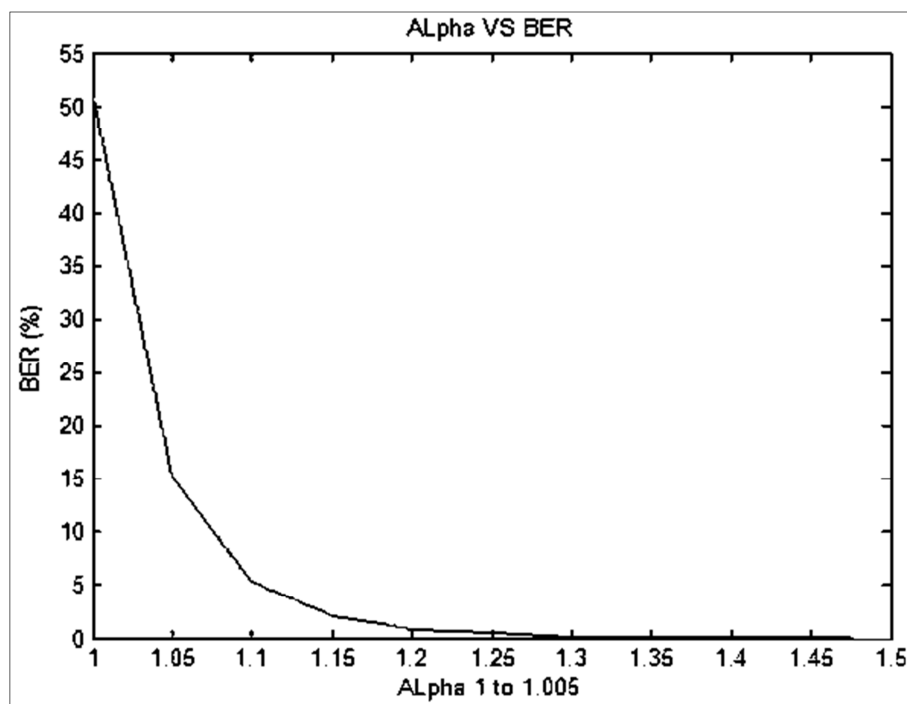
รูปที่ 3.19 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Low-pass filter

ค่า NC และ BER ที่ได้จากการทดลองตามรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19 มีค่าน้อยลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ Lowpass filter ได้มีการกรององค์ประกอบสัญญาณเสียงทางด้านความถี่สูงออก ซึ่งลายน้ำส่วนใหญ่ที่ได้ฝังตัวอยู่ในช่วงของความถี่กลางก่อนไปทางต่ำก็จะหายไปด้วย แต่อย่างไรนั้นจะต้องคำนึงถึงช่วงความถี่ตัดขาด (Cutoff frequency) ของ Lowpass Filter ด้วย โดยในการทดลองนี้ทำการใช้ความถี่ตัดขาดที่ 300Hz ที่ระดับการลดทอน-15dB ซึ่งเป็นการกรองที่รุนแรงมาก

- การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำ บันทึกเป็น Wave File และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่สูงใช้ความถี่ตัดขาดที่ 3 KHz ที่ -15dB



รูปที่ 3.20 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน High-pass filter

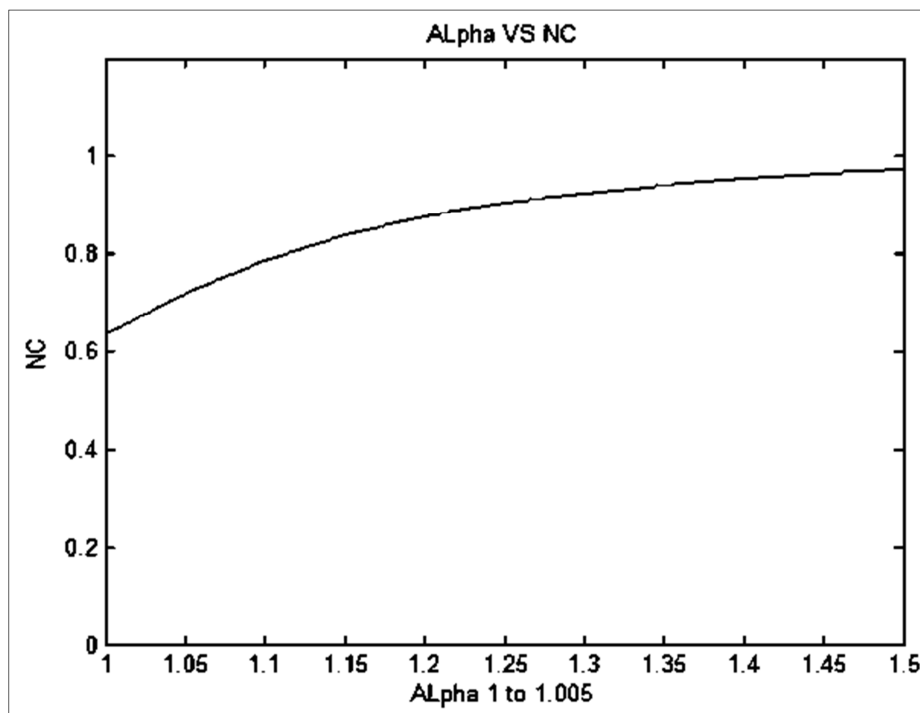


รูปที่ 3.21 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน High-pass filter

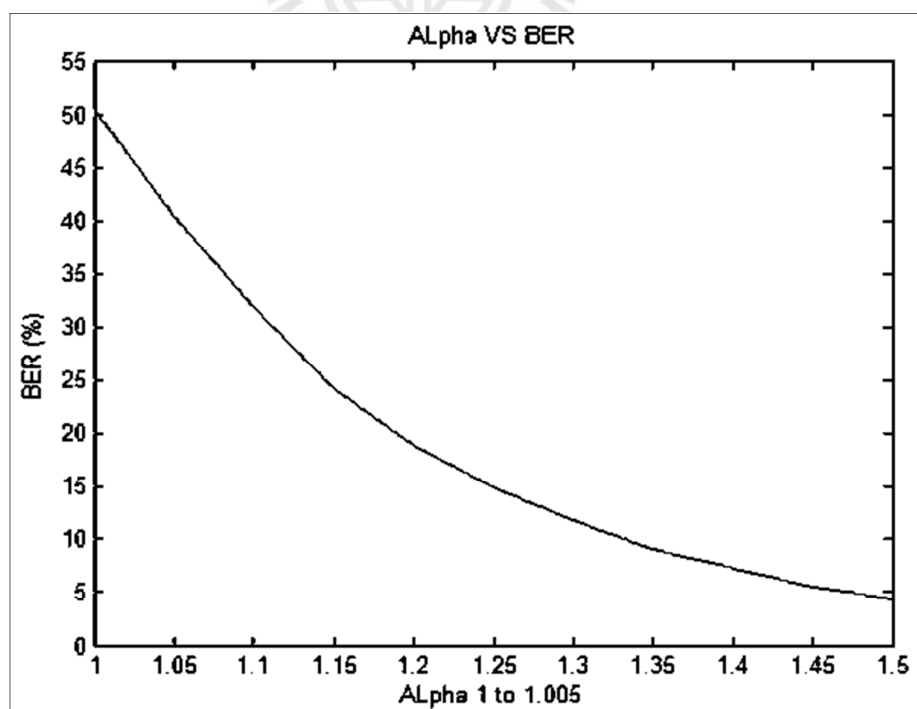
ค่า NC และ BER ที่ได้จากการทดลองมีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับผลกระทบที่เกิดจาก Low-pass filter เพราะโดยส่วนมากลายน้ำที่ฝังอยู่ได้กระจายตัวไปในส่วนที่เป็นความถี่กลางก่อนไปทางต่ำจึงมีผลกระทบน้อยเมื่อเทียบกับผ่าน Low-pass filter

- การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) การทดลองทำได้โดย นำเอาข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำ บันทึกเป็น Wavefile และผ่านโปรแกรมปรับแต่งเสียง เพื่อทำการกรองเอาเฉพาะช่วงความถี่กลางใช้ความถี่ตัดขาดด้านต่ำที่ 300 Hz และด้านความถี่สูงที่ 3 KHz ที่ระดับการลดทอน -15dB ทั้งสองจุดตัด

ถึงแม้การทำ Band-pass filter ได้ตัดเฉพาะช่วงความถี่ตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3 kHz ส่งผลให้ค่า NC และ ค่า BER อยู่ในระดับปานกลางระหว่าง High-pass filter และ Low-pass filter attacks ทั้งนี้เพราะลายน้ำที่ฝังตัวมีบางส่วนเข้ามากระจายตัวอยู่ในช่วงความถี่กลางนี้ จึงทำให้ค่า NC และ BER มีผลกระทบอยู่ในระดับปานกลางนั่นเอง

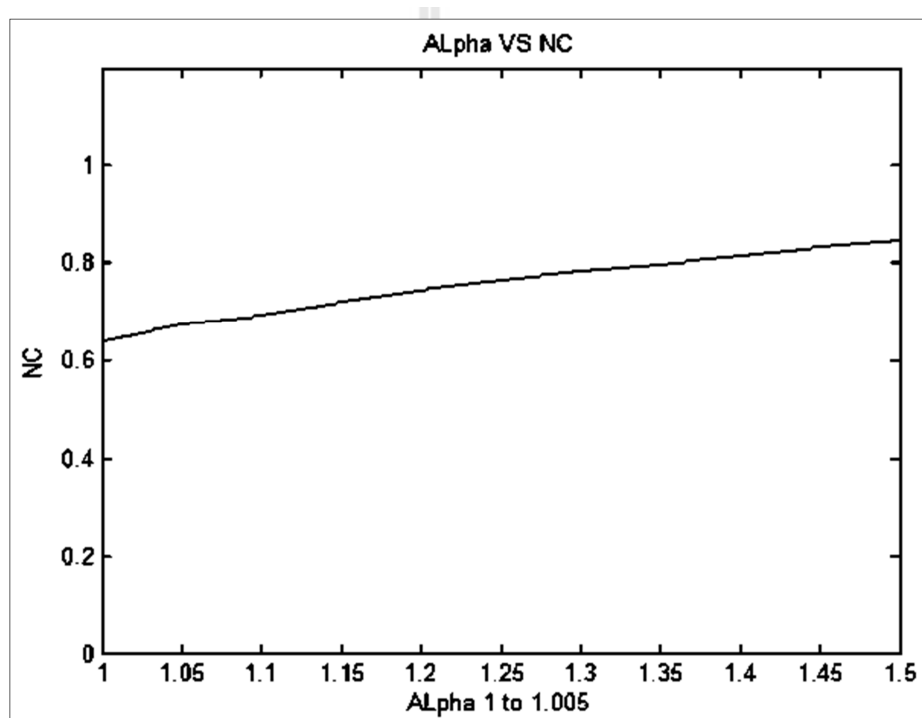


รูปที่ 3.22 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน Band-pass Filter

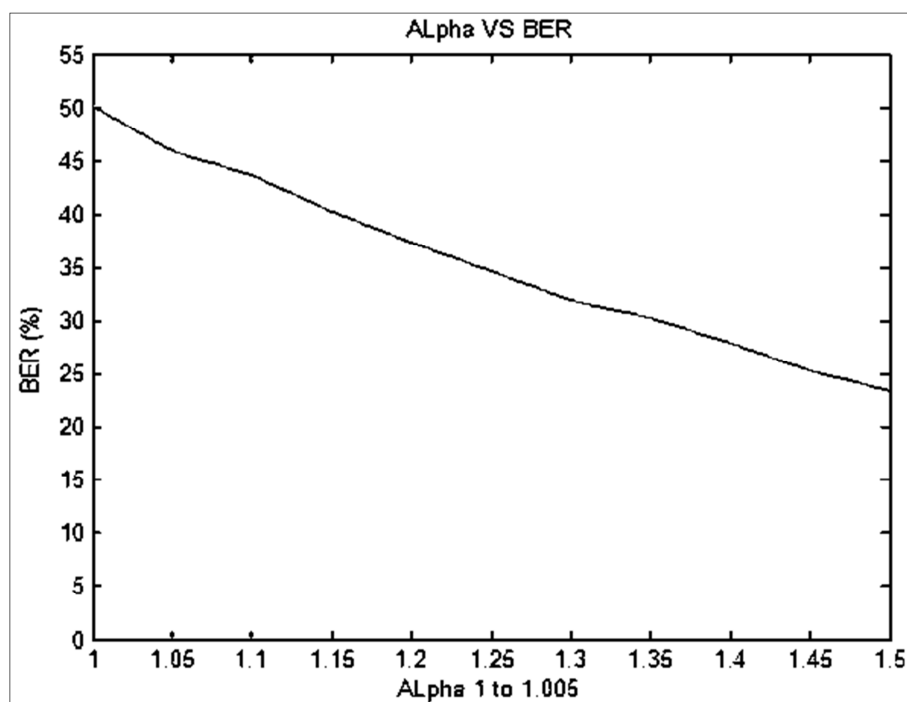


รูปที่ 3.23 ค่า Alpha เทียบกับค่า BER เมื่อผ่าน Band-pass Filter

- การโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลโดย MP3 Compression ในขั้นตอนของการทดลองได้ นำข้อมูลที่ได้จากการฝังลายน้ำมาบันทึกเป็นไฟล์ฟอร์แมต MP3 ที่อัตราบิต (Bit rate) 64 Kbps และ อัตราการซีกตัวอย่างที่ 48,000 Hz ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะต้องมีการค้นหาตำแหน่งของข้อมูลใหม่ เนื่องจากกระบวนการแปลงเป็น MP3 จะทำให้จำนวนข้อมูลเพิ่มมากขึ้น การโจมตีในรูปแบบนี้จะมี ความรุนแรงมากเป็นพิเศษ แต่ผลที่ได้ก็ยังสามารถพบสัญญาณลายน้ำ ที่หลงเหลืออยู่ได้ ซึ่งอาจจะ สามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มจำนวนของข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจในแต่ละบิต และทั้งนี้ระดับค่า การบีบอัดข้อมูลของ MP3 นั้นการทดลองนี้ใช้ที่ 64 kbps ซึ่งเป็นผลกระทบที่มากพอสมควร



รูปที่ 3.24 ค่า Alpha เทียบกับค่า NC เมื่อผ่าน MP3 Compression



รูปที่ 3.25 ค่า Alpha เทียบกับ NC และ BER เมื่อผ่าน MP3 Compression

3.8 สรุปผลการทดสอบความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ

จากการทดสอบที่ผ่านมามีผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในข้างต้น นั่นก็คือการฝังลายน้ำในกลุ่มย่านความถี่ที่มีผลกระทบน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลต เพื่อคัดแยกย่านความถี่สำหรับฝังลายน้ำ ซึ่งได้ข้อสรุปว่าการฝังในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำ นั้นเป็นย่านความถี่ที่เหมาะสม แต่ก็อาจมีข้อเสียเมื่อต้องผ่านการโจมตีโดย Low-pass Filter และ MP3 Compression ซึ่งอาจจะมีผลกระทบในย่านความถี่ที่ฝังมากกว่าการโจมตีรูปแบบอื่น ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพลายน้ำไบনারีขนาด 64x64 บิต ขนาดหน้าต่าง 64 จุด ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 3.1 และภาพลายน้ำที่ผ่านจากการโจมตี ที่ระดับค่า BER ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.26 ซึ่งจะเห็นว่า ที่ระดับค่า BER ที่ 9.3125 ก็ยังสามารถสังเกตเห็นภาพลายน้ำได้



รูปที่ 3.26 ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี ที่ระดับค่า BER ต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 3.1 ค่า BER จากการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่าง ๆ

Alpha	SNR (dB)	BER (%)			
		Low-pass filter fc = 1KHz	High-pass filter fc = 1KHz	Noise addition -10 dB	MP3Compression 32Kbit 48KHz
1.2	33.3859	0.0000	0.0000	1.0312	26.0156
1.4	28.8243	0.0000	0.0000	0.5156	21.1406
1.6	25.8898	0.0000	0.0000	0.2500	16.1250
1.8	23.7468	0.0000	0.0000	0.1250	8.0000
2.0	22.0548	0.0000	0.0000	0.1250	53906
2.2	20.6525	0.0000	0.0000	0.2344	3.5625

ในการทดลองสุดท้ายได้ทำการทดสอบโดยการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก และเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัลอีกครั้ง (DAC & ADC) ผ่านทางรูปสัญญาณแบบ PCM เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการถอดภาพลายน้ำและคำนวณค่า BER ในการทดลองนี้ได้ใช้ภาพลายน้ำไบนารีขนาด 64X64 บิต ขนาดหน้าต่าง 64 จุด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะพบว่าเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ได้ออกแบบขึ้น มีความทนทานการเปลี่ยนแปลงระหว่างสัญญาณดิจิทัลกับสัญญาณแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี และตารางที่ 3.3 จะแสดงถึงการทำลายน้ำในข้อมูลสัญญาณเสียงเพลงในรูปแบบต่างๆ ซึ่งใช้ค่า α คงที่เท่ากับ 1.4 และภาพลายน้ำไบนารีขนาด 64X64 บิต โดยมีขนาดหน้าต่าง 64 จุด ซึ่งพบว่าการโจมตีจากการบีบอัดสัญญาณ MP3 Compression ของไฟล์เพลงเดี่ยวขลุ่ยเพียงออและเดี่ยวระนาดเอก มีค่า BER ที่มากกว่ารูปแบบเพลงอื่นๆ เนื่องจากการฝังที่ใช้ค่า α คงที่เท่ากันหมดทำให้คุณภาพของลายน้ำหรือค่า SNR ไม่เท่ากันเนื่องจากองค์ประกอบของย่านความถี่ที่ใช้ฝังในเพลงแต่ละรูปแบบมีองค์ประกอบของความถี่ที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าของ SNR ของเพลงเดี่ยวขลุ่ยเพียงออและเดี่ยวระนาดเอกมีค่าสูง หรือมีความเข้มข้นในการฝังลายน้ำไม่มาก จึงทำให้มีความทนทานที่ต่ำกว่าเพลงในรูปแบบอื่น

ตารางที่ 3.2 การโจมตีด้วย การขยายสัญญาณและการแปลงสัญญาณ DAC&ADC

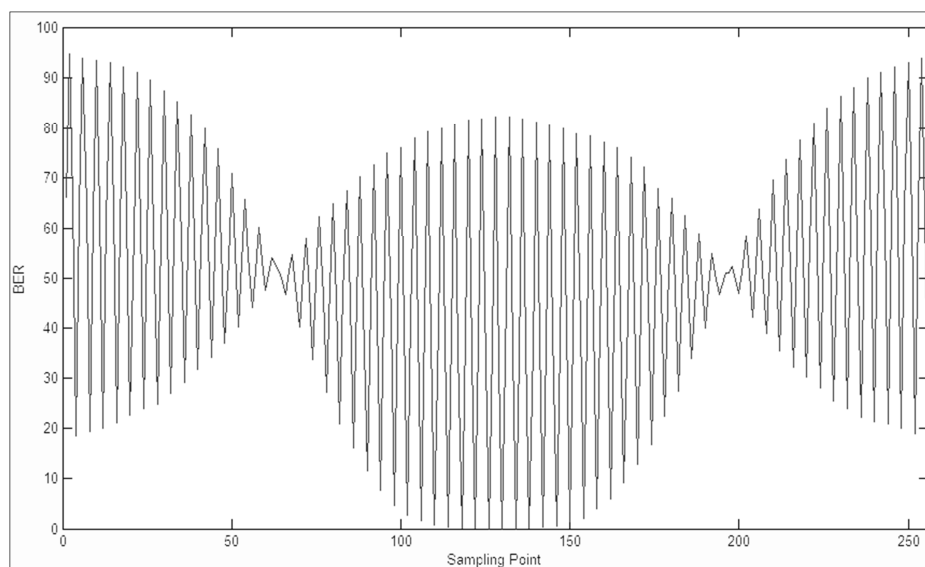
Alpha	SNR (dB)	BER (%)				
		ค่าอัตราการปรับระดับสัญญาณ (เท่า)				DAC & ADC
		0.2	0.8	1.2	1.8	
1.2	33.3859	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06250
1.4	28.8243	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.6	25.8898	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.8	23.7468	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.0	22.0548	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.2	20.6525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 3.3 การทดลองด้วยตัวอย่างเพลงประเภทต่าง ๆ ที่ค่าคงที่ $\alpha = 1.4$

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	BER (%)			
		No Attack	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz	DAC & ADC
Dance	21.6968	0.00000	0.00000	5.2656	0.00000
Rock	21.7068	0.00000	0.00000	8.6719	0.00000
Pop	22.7270	0.00000	0.00000	6.3906	0.00000
ลูกทุ่ง	24.2587	0.00000	0.00000	9.3125	0.00000
เด็วขลุ่ยเพียงออ	25.1575	0.00000	0.0469	17.0156	0.00000
เด็วระนาดเอก	28.8243	0.00000	0.5156	21.1406	0.00000

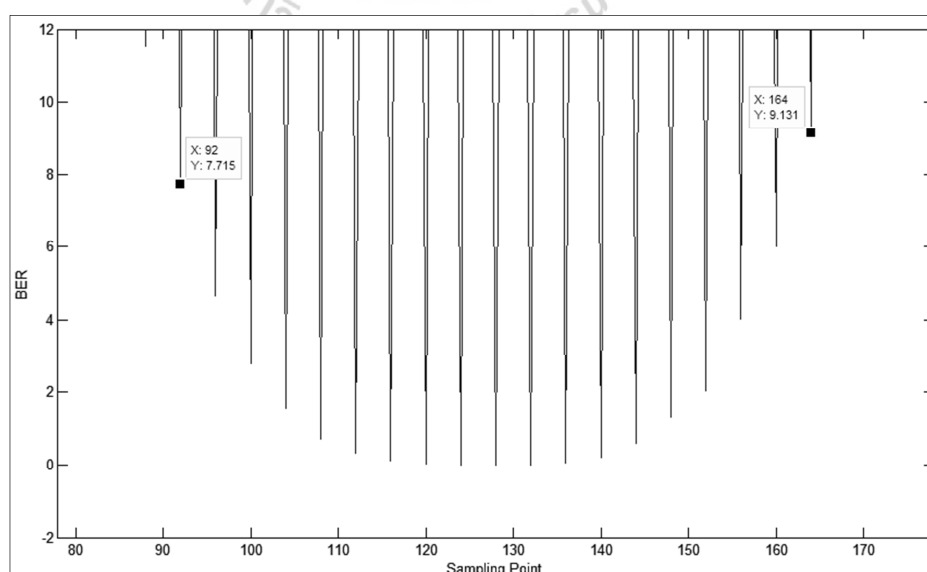
3.9 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตในย่านความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนี้มีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่นการโจมตีด้วยสัญญาณรบกวนการโจมตีด้วยการกรองความถี่ต่ำผ่าน การโจมตีด้วยการกรองความถี่สูงผ่าน การโจมตีด้วยการกรองแถบความถี่ผ่านการโจมตีด้วยการบีบอัดข้อมูลแบบ MP3 และยังมีมีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี

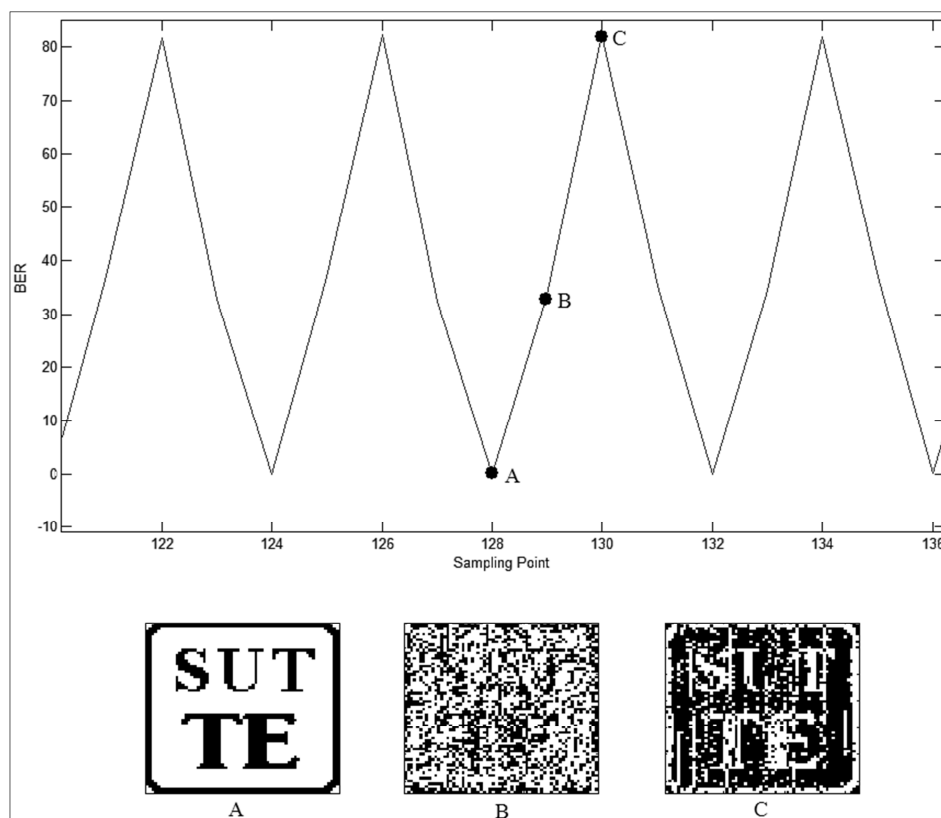


รูปที่ 4.2 ค่า BER เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ ค่าความถูกต้องของภาพลายน้ำที่ถอดได้จะถูกตัดที่สุดเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเริ่มต้นที่ 128 จุด แต่เมื่อพิจารณาขอบเขตที่ BER ต่ำกว่า 10% วิธีการนี้จะสามารถค้นหาภาพลายน้ำที่ถูกตัดได้ในช่วง 36 จุดจากจุดเริ่มต้นของการฝังลายน้ำดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่า BER ช่วงเข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อเลื่อนตำแหน่งการถอดลายน้ำ



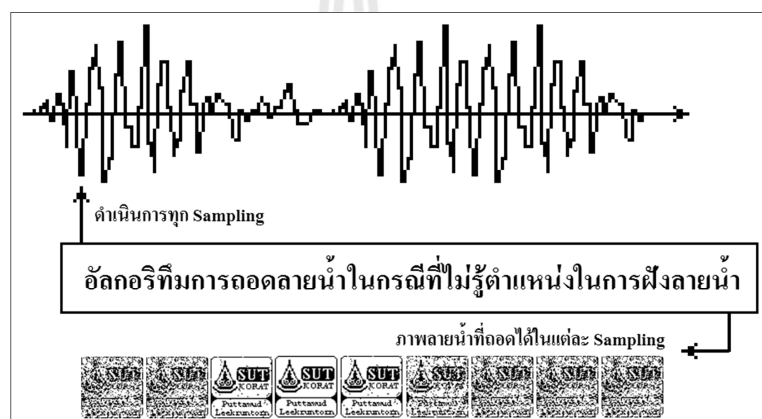
รูปที่ 4.4 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้น

และเมื่อพิจารณาระยะ ± 4 จุด ระหว่างจุดเริ่มต้นในการฝังค่าความถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเลื่อนออกไปเพียงแค่จุดเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพลายน้ำที่ถอดมาได้ในแต่ละจุดจะพบว่า ภาพลายน้ำจะไม่ชัดเจนเมื่อค่า BER เข้าสู่ 50% และจะแสดงออกมาเป็นภาพส่วนกลับเมื่อ BER สูงกว่า 50% ขึ้นไป แต่เมื่อเลื่อนตำแหน่งออกไปเพียงจุดเดียวภาพลายน้ำที่ได้จะเสียทันที และจะกลับมาถูกต้องอีกครั้งเมื่อผ่านไป 4 จุดและจะเกิดในลักษณะนี้ทุกๆ 4 จุด สาเหตุเกิดขึ้นจากขั้นตอนการแปลงเวฟเลต ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้การแปลงเวฟเลตในรูปแบบของ Haar wavelet ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการแปลงเพียงสองจุด และเมื่อแปลงเวฟเลตสองระดับจึงต้องใช้ทั้งหมด 4 จุดทำให้เกิดความถูกต้องของกระบวนการเมื่อครบรอบที่ละ 4 จุด

4.3 เทคนิคการทำลายน้ำแบบเวลาจริง

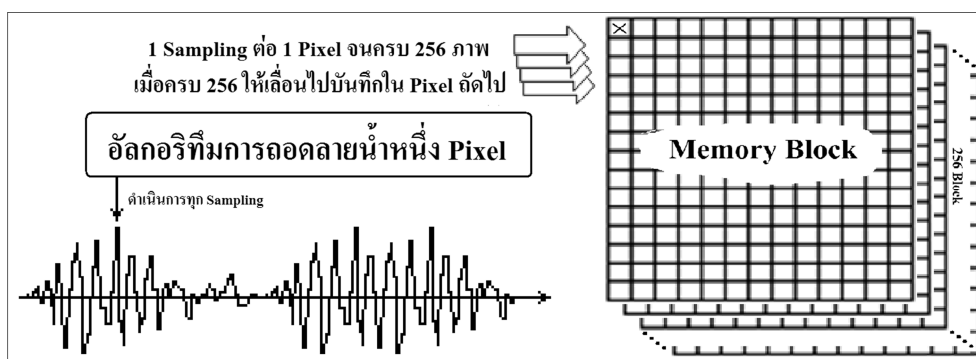
การทำลายน้ำในเวลาจริงจะต้องดำเนินการบนพื้นฐานการประมวลผลที่มีค่าความเร็วสูง อัลกอริทึมที่ไม่ซับซ้อน และสามารถตอบสนองต่อความถูกต้องได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ค้นคิดอัลกอริทึมที่จะสามารถตอบสนองความถูกต้องบนความเรียบง่ายที่สุด และเมื่อ

พิจารณาผลการทดลองที่ผ่านมา การค้นหาภาพลายน้ำโดยการค้นหาที่ละจุดของสัญญาณ นั้นพบว่า เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายที่สุด เพราะการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของลายน้ำที่ฝังอยู่นั้น จะต้องมีการทำงานอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะใช้วิธีการค้นหาด้วยการค้นหาเพียงแค่ครั้งแรกครั้งเดียว เพราะในครั้งต่อไปในการทำงานจริงอาจจะอยู่ในคาบเวลาเดิมหรืออาจจะมีการเลื่อนออกไปจากเดิมก็ได้ และโดยเฉพาะวิธีการค้นหาจุดเริ่มต้นของการฝังนั้นจะมีการถอดภาพลายน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับเพื่อให้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนอยู่แล้ว ดังนั้นวิธีการค้นหาโดยการดำเนินการทีละ Sampling ตำแหน่งของการฝังก็ไม่สำคัญอีกต่อไป เพราะจะสามารถรับรู้ถึงภาพลายน้ำที่ถอดได้ในทุก Sampling อยู่แล้วเพียงแค่นำภาพลายน้ำที่ถูกตัดที่สุดแสดงต่อผู้ใช้งานในช่วงเวลาที่อัลกอริทึมพบเจอเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 4.5 ภาพลายน้ำที่ถอดได้ใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นฝัง

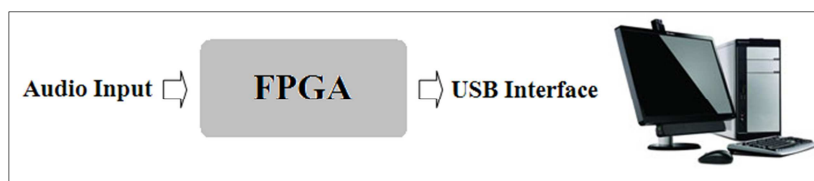
ขั้นตอนการถอดลายน้ำ ในกรณีที่ไม่รู้ตำแหน่งในการฝังลายน้ำ จะทำเหมือนกันกับกรณีที่รู้ตำแหน่ง แตกต่างกันตรงที่มีขั้นตอนดำเนินการในทุก Sampling ซึ่งอัลกอริทึมการถอดลายน้ำใหม่นี้ จะต้องใช้การประมวลผลที่มีความไวสูงเนื่องจากการค้นหาภาพลายน้ำต้องดำเนินการให้ทันภายในค่าเวลาของการ Sampling สัญญาณเสียง เพราะการถอดภาพลายน้ำในหนึ่งพิกเซลของภาพลายน้ำจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงเป็นจำนวน 4 เท่าของหน้าตาต่างเนื่องจากการแปลงเวฟเล็ดสองระดับและถ้าต้องการหนึ่งภาพจะต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงเป็นจำนวน 4 x หน้าตาต่างขนาดของภาพลายน้ำ เช่นภาพลายน้ำที่ใช้ฝังเป็นภาพไบทรีขนาด 64x64 บิต และใช้หน้าตาต่างขนาด 64 จุด จะใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงทั้งสิ้น $4 \times 64 \times 64 \times 64$ เท่ากับ 1,048,576 จุด ซึ่งถ้าหากใช้สัญญาณเสียงในรูปแบบ 16 bits 48 KHz ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดจะต้องประมวลผลข้อมูลขนาด 16.77 Mbits หรือ 2.09 Mbyte ใน 20.83 μ s ดังนั้นจึงต้องอาศัยวงจรดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงเข้ามาแก้ไขปัญหานี้



รูปที่ 4.6 การเตรียมหน่วยความจำของภาพลายน้ำที่ถอดได้

สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอย่างแรกคือ โครงสร้างของลายน้ำที่ฝังตัวอยู่ในข้อมูลสัญญาณเสียง ซึ่งการฝังลายน้ำในแต่ละพิกเซล ต้องใช้จำนวนข้อมูลเสียงทั้งหมด 256 Sampling ในกรณีที่ยกตัวอย่างขนาดของ windows เท่ากับ 64 จุด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีข้อมูลทั้งหมด 256 พิกเซลซึ่งเป็นเพียงหนึ่งพิกเซลในองค์ประกอบของแต่ละภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพและหนึ่งใน 256 พิกเซล จะมีเพียง 1 พิกเซลเท่านั้นที่เป็นภาพลายน้ำที่ถูกต้อง ในการทำเช่นนี้จะต้องเตรียมพื้นที่สำหรับทำเป็นหน่วยความจำ (Memory) ทั้งหมด 256 Block โดยในแต่ละ Block จะขึ้นอยู่กับจำนวนพิกเซลของภาพลายน้ำที่ใช้ในการฝัง เช่น ใช้ภาพไบนารีขนาด 64X64 บิตดังนั้นต้องใช้ขนาด 4,096 บิตหรือขนาด 500 byte ในหนึ่ง Block ซึ่งต้องใช้หน่วยความจำทั้งหมด 128 Kbyte เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำ 256 ภาพ

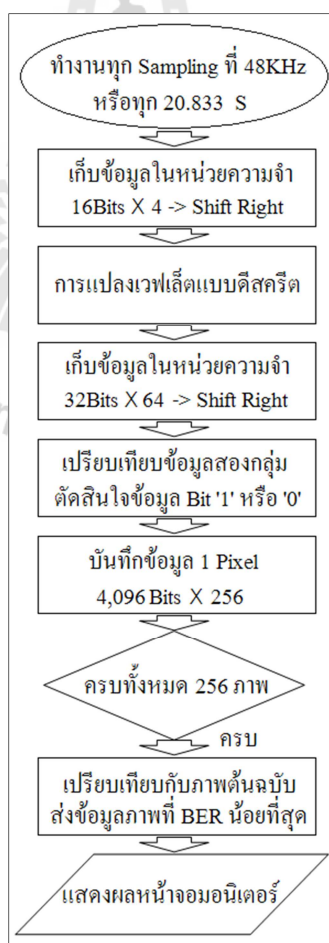
เมื่อได้ภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพครบทุกพิกเซล จึงทำการเปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ได้กับภาพลายน้ำต้นฉบับเพื่อนำภาพที่มีค่า BER น้อยที่สุดส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลออกทางหน้าจอจอมอนิเตอร์ ซึ่งถ้าหากใช้สัญญาณเสียงที่มีการเข้ารหัสสัญญาณขนาด 16 บิต และมีอัตราการชักตัวอย่าง 48 KHz ภาพลายน้ำเป็นภาพไบนารีขนาด 64X64 บิตและใช้ขนาดของ หน้าต่างเท่ากับ 64 จุดกระบวนการทั้งหมดจะใช้เวลาทั้งหมด 21.84533 วินาทีต่อภาพลายน้ำหนึ่งภาพ และในส่วนของวงจรที่ใช้ในการดำเนินงาน มีสองทางเลือกที่สามารถทำได้ นั่นก็คือการใช้งาน Digital signal processor (DSP) และอีกเทคโนโลยีคือ Field programmable gate array (FPGA) ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือก FPGA เนื่องจากมีความสามารถและความยืดหยุ่นเพียงพอสำหรับออกแบบระบบการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง



รูปที่ 4.7 แผนภาพการถอดรหัสน้ำแบบเวลาจริง

4.4 สรุป

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจะสามารถออกแบบอัลกอริทึมการถอดรหัสน้ำแบบเวลาจริงได้ โดยพิจารณาทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และวิธีการบันทึกข้อมูลในหน่วยหน่วยความจำ กระบวนการทั้งหมดสามารถเขียนอัลกอริทึมได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 อัลกอริทึมการถอดรหัสน้ำแบบเวลาจริง

จากอัลกอริทึมข้างต้นจะทำงานภาพได้เร็วขึ้นโดยใช้การแปลงข้อมูลจากสัญญาณขาเข้าในรูปแบบ PCM 16 Bits 48KHz ส่งโดยใช้ภาพลายน้ำไบনারีขนาด 64x64 พิกเซล และขนาดของ Windows เท่ากับ 64 จุด การทำงานจะทำทุก Sampling ข้อมูลที่เข้ามาจะถูกเก็บเข้าสู่หน่วยความจำขนาด 16 Bits ทั้งหมด 4 ชุด เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ดจะใช้ข้อมูล 4Sampling เพื่อแปลงเวฟเล็ด 2 ระดับ และเมื่อแปลงเวฟเล็ดแล้วจะนำข้อมูลที่ได้นำเข้าเก็บไว้ในแหล่งบันทึกข้อมูลที่มีขนาด 64 Bits ทั้งหมด 64 ชุดตามขนาดของ Windows และทำการเปรียบเทียบข้อมูลโดยแบ่งเป็นสองส่วน และเปรียบเทียบกันเพื่อตัดสินใจว่าจะเป็น Bit '0' หรือ Bit '1'

ข้อมูลภาพลายน้ำที่ได้จากการตัดสินใจจะถูกส่งเข้าเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งได้ออกแบบตามเทคนิคที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 ซึ่งจะเก็บข้อมูล Pixel ที่ได้ให้ครบทั้ง 256 ภาพ (ที่หน้าต่างเท่ากับ 64 จุด) ก่อนที่จะเปลี่ยนไปเก็บใน Pixel ถัดไปโดยเริ่มที่หน่วยความจำภาพลายน้ำภาพแรก เมื่อเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด 256 ภาพ ครบทุกพิกเซลจะนำข้อมูลทั้งหมดเปรียบเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับและส่งข้อมูลภาพลายน้ำที่ค่าความถูกต้องดีที่สุดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลบนจอมอนิเตอร์ให้ผู้ใช้งานได้รับทราบ จากนั้นจะวนกลับไปทำงานในรอบใหม่โดยใช้กระบวนการเดิม



บทที่ 5

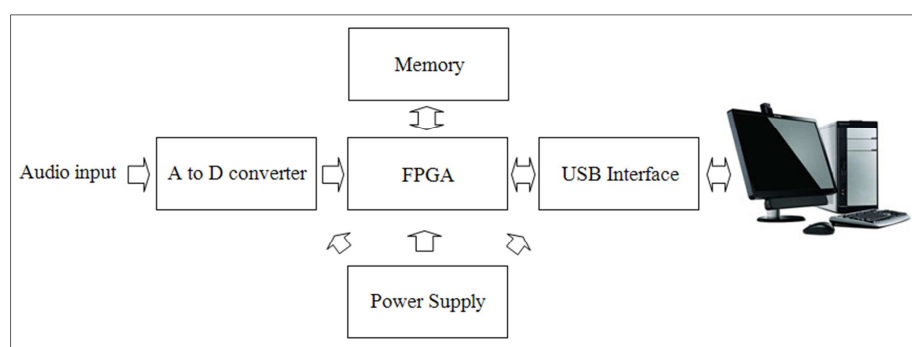
การออกแบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

5.1 บทนำ

ในการทำงานของวงจรถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลสามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน นั่นก็คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนซอฟต์แวร์ซึ่งเป็นโปรแกรมประมวลผลสัญญาณและแสดงผลของการถอดลายน้ำ ทั้งในส่วนที่ทำงานบนวงจรและในส่วนของการแสดงผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยหัวใจหลักที่งานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้คือ Field programmable gate array (FPGA) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภาครับสัญญาณขาเข้าแบบ PCM โดยใช้ชิพ PCM1808 ที่สามารถรับสัญญาณเสียงขาเข้าและแปลงออกเป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบ PCM 16 bits 48 KHz sampling ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานของข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ส่วนทางภาคส่งข้อมูลภาพลายน้ำขาออกได้ออกแบบโดยการใช้ชิพ FT245RL ซึ่งเป็นชิพที่มีหน้าที่เชื่อมต่อเครื่องคอมพิวเตอร์กับวงจรภายนอกผ่าน Universal serial bus (USB) ซึ่งทั้งหมดได้มีการจัดการตามที่ได้กล่าวในบทนี้

5.2 วงจรการถอดลายน้ำดิจิทัล

วงจรการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลประกอบไปด้วย ภาครับสัญญาณเสียง หน่วยประมวลผลกลาง หน่วยความจำ และภาคส่งข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังต่อไปนี้

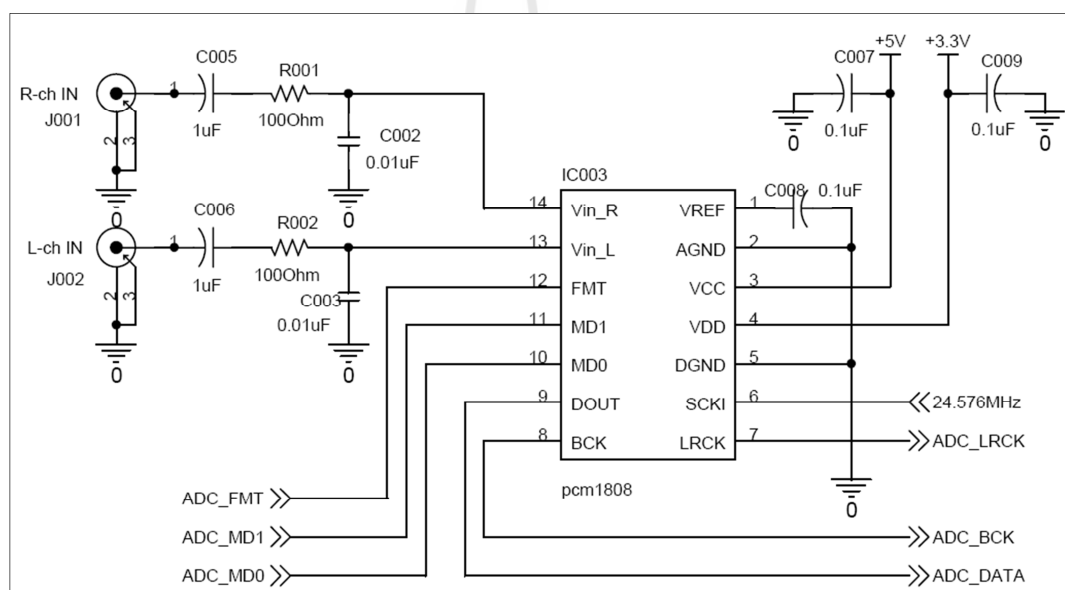


รูปที่ 5.1 แผนภาพวงจรถอดลายน้ำดิจิทัล

ในบล็อกโคเดแกรมสัญญาณขาเข้าซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะเข้าสู่กระบวนการแปลงแบบ PCM (Pulse code modulation) เป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบ PCM 16 Bits 48 KHz และจะส่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลกลางที่ใช้ชิพ FPGA ทำหน้าที่ถอดลายน้ำและส่งภาพลายน้ำที่มีค่าความถูกต้องที่สุดเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB เพื่อแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ และการทำงานของวงจรทั้งหมดจะอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานจากวงจรรักษาระดับแรงดันทั้งหมด 4 ระดับคือ +5V +3.3V +2.5V +1.2V ซึ่งรายละเอียดของวงจรจะแสดงในหัวข้อถัดไป

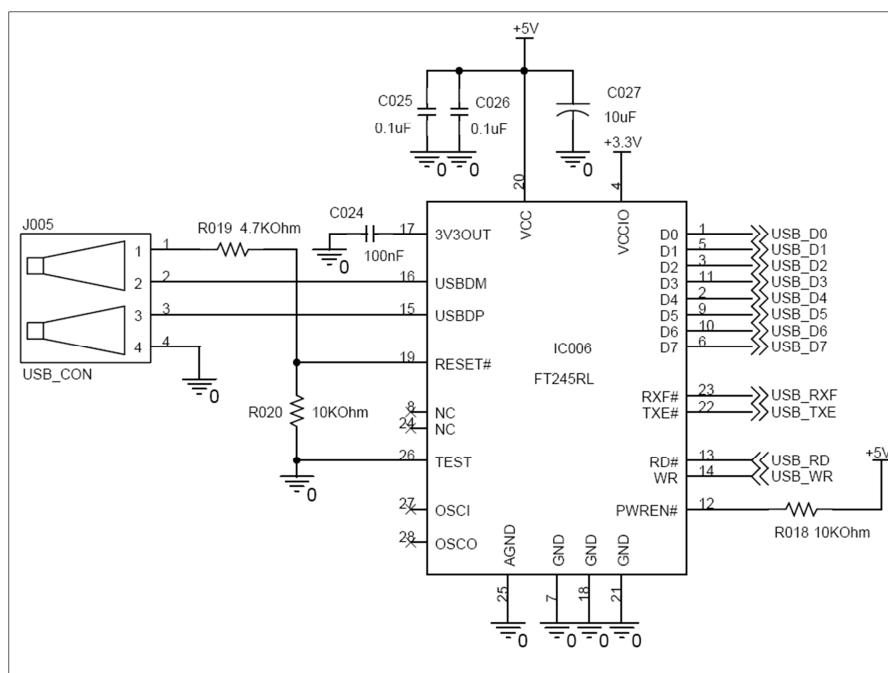
5.3 วงจรภาค Input และ Output

ในวงจรภาครับส่งจะมีอยู่สองส่วนคือภาครับสัญญาณเสียงและเปลี่ยนเป็น PCM และส่งข้อมูลภาพลายน้ำเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่าน USB



รูปที่ 5.2 วงจรภาครับสัญญาณเสียงโดยใช้ PCM1808

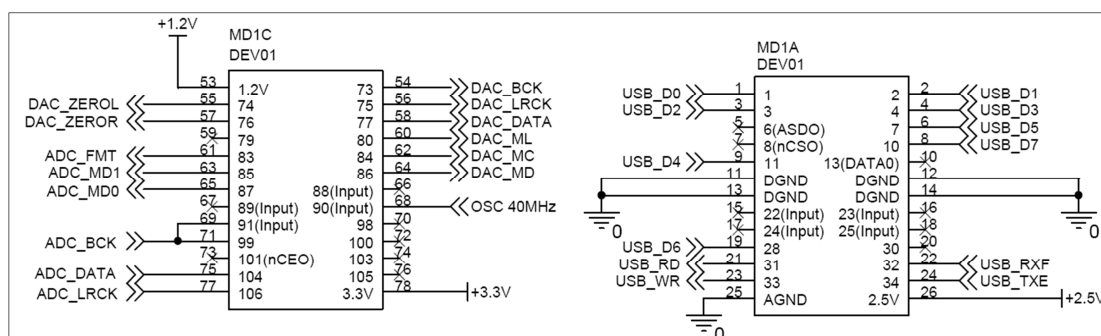
ในวงจรรูปที่ 5.2 แสดงการเชื่อมต่อของชิพ PCM1808 ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณเสียงในรูปแอนะล็อกเป็นข้อมูลสัญญาณดิจิทัลแบบ PCM โดยสัญญาณขาเข้าจะรับสัญญาณเสียงได้ไม่เกิน 3 Vp-p และสามารถดำเนินการได้ในช่วง 8 KHz ถึง 96 KHz Sampling ซึ่งจะสามารถเลือกทำงานได้ที่ 48 KHz ทำงานโดยอาศัยการกระตุ้นด้วยสัญญาณนาฬิกาความถี่ 24.576 MHz และส่งถ่ายข้อมูลดิจิทัลที่ได้เข้าสู่ชิพ FPGA ด้วยระดับแรงดัน 0 ถึง 3.3V วงจรนี้ไม่จำเป็นต้องมีวงจรคั่นกลางระหว่างสัญญาณอินพุตกับตัวชิพเพราะชิพได้ออกแบบมาในรูปแบบของ Single-Ended



รูปที่ 5.3 วงจรเชื่อมต่อผ่าน USB ด้วยชิพ FT245RL

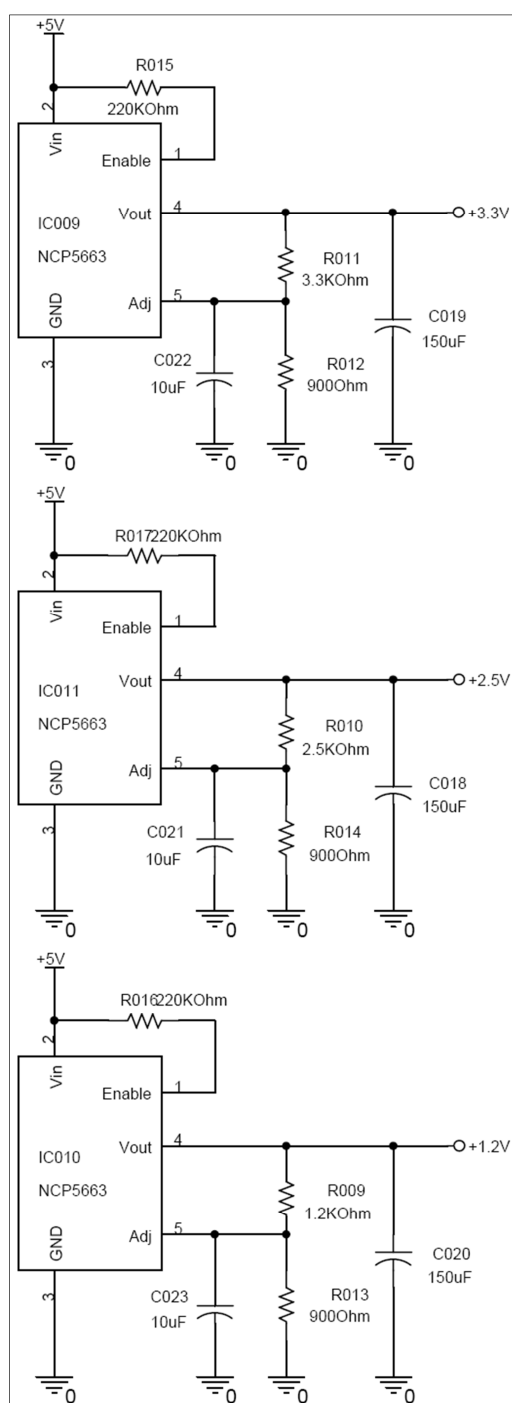
5.4 วงจรหน่วยประมวลผลกลางและแหล่งจ่ายพลังงาน

หน่วยประมวลผลกลางใช้ชิพ FPGA เบอร์ EP3C5E144C8N ซึ่งเป็นชิพ FPGA ของบริษัท ALTERA รุ่น Cyclone III มีจำนวนของชิ้นส่วน Logic อยู่ที่ 5,136 Logic elements มีหน่วยความจำ (RAM) ในตัว 423,936 Bits การทำงานของชิพ FPGA จะอาศัยการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการสังเคราะห์วงจรก่อนที่จะโปรแกรมให้ชิพทำงานตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ และจะเชื่อมต่อกับวงจรในภาคต่างๆ เข้ากับชิพ FPGA ตามรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อ FPGA เข้ากับภาค Input Output และหน่วยความจำ

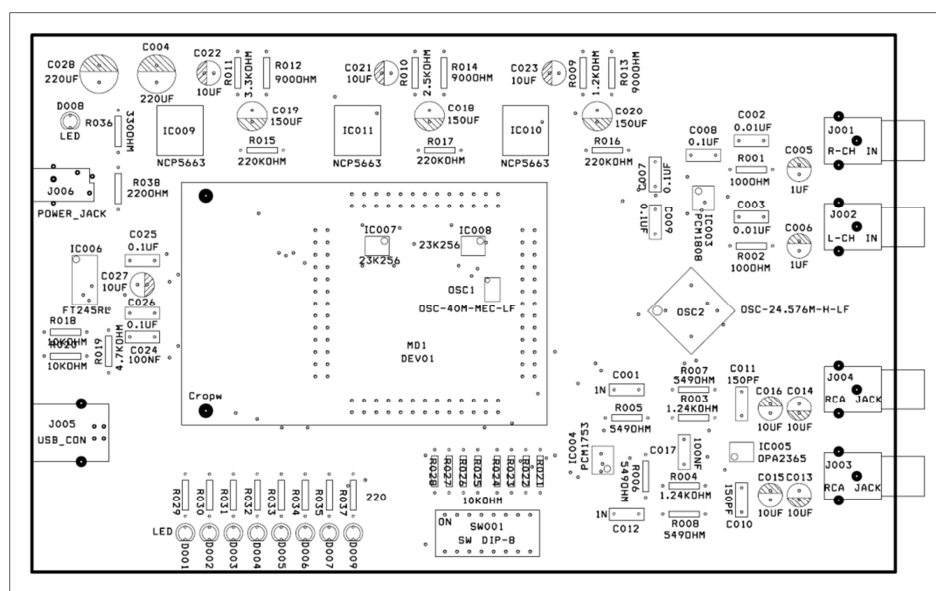
ในการทำงานของวงจรจะต้องอาศัยพลังงานจากแหล่งจ่าย 4 ระดับคือ +5V +3.3V +2.5V +1.2V ซึ่งได้ออกแบบโดยอาศัยชิพ NCP5663 ในการแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายหลักที่ +5V ออกเป็นระดับแรงดันที่น้อย ๆ ดังกล่าวข้างต้น



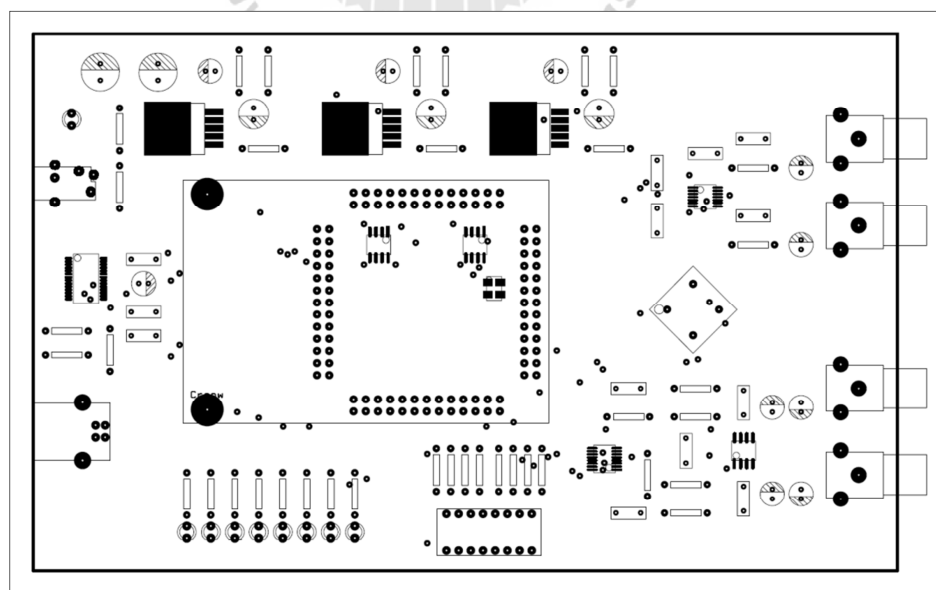
รูปที่ 5.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันในวงจรถอดลายน้ำ

5.5 แผ่นวงจรฮาร์ดแวร์

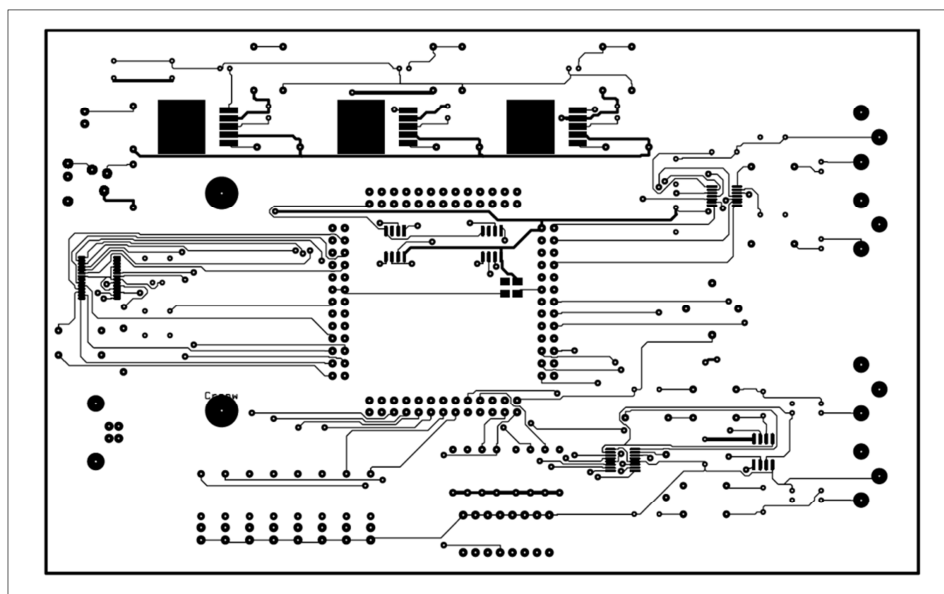
แผ่นวงจรที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมสร้างลายวงจร ซึ่งมีการออกแบบแผ่น PCB แบบสองหน้าตามรูปที่ 5.6 ถึง 5.9 เมื่อประกอบวงจรสมบูรณ์แล้วจะได้วงจรดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.13



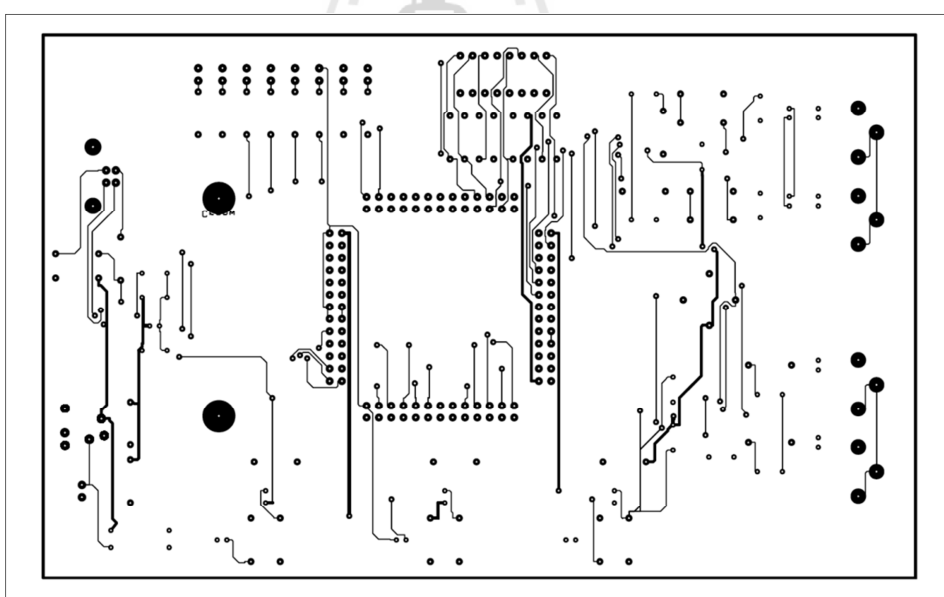
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนแผ่น PCB



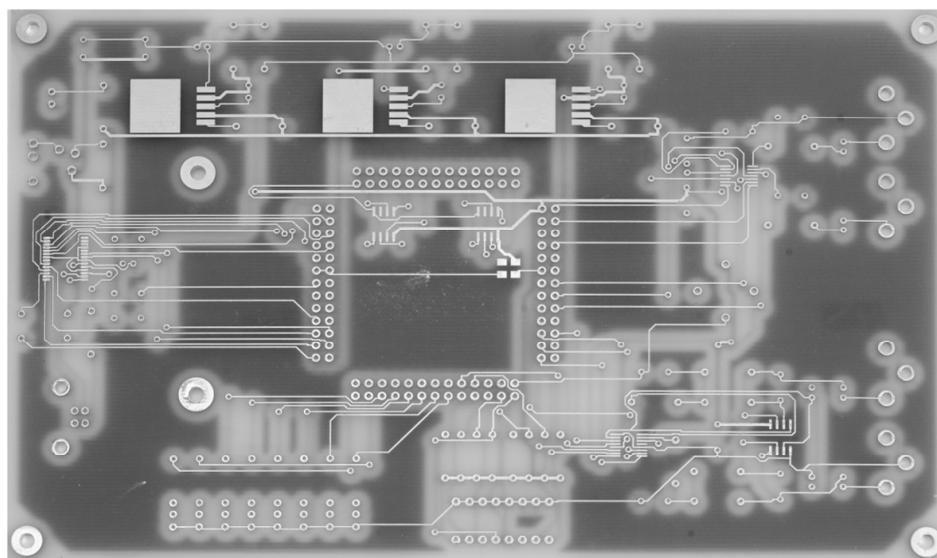
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งบัดกรีอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB



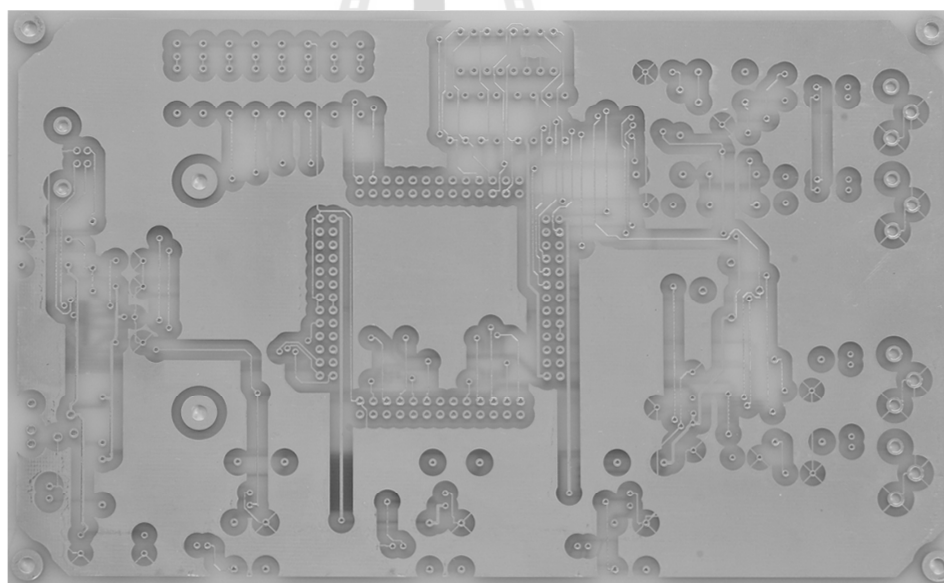
รูปที่ 5.8 ลายทองแดงของวงจรด้านบน



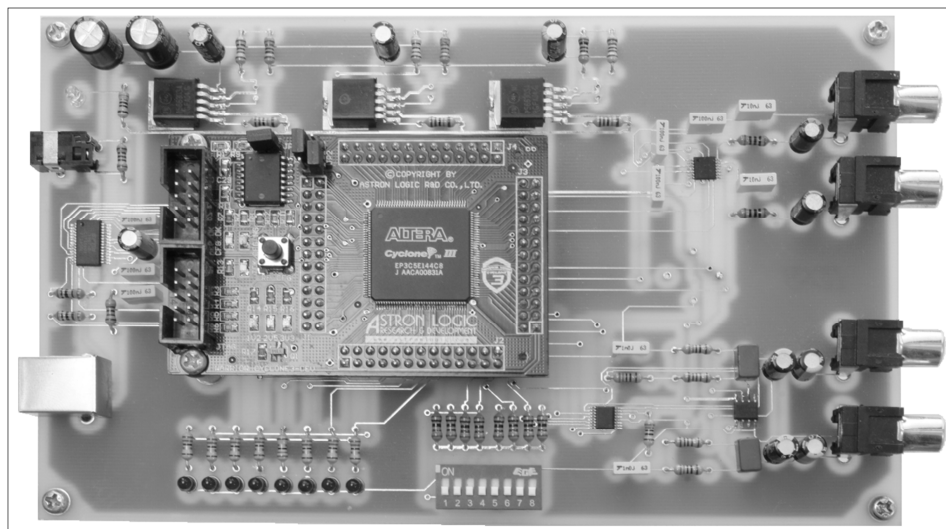
รูปที่ 5.9 ลายทองแดงของวงจรด้านล่าง



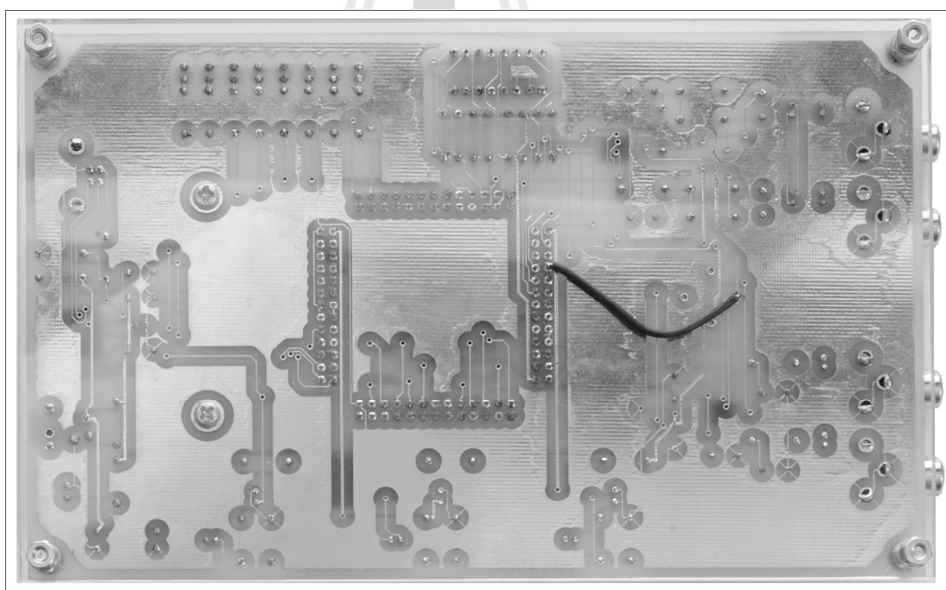
รูปที่ 5.10 แผ่นทองแดงด้านบนเมื่อกัดเสร็จแล้ว



รูปที่ 5.11 แผ่นทองแดงด้านล่างเมื่อกัดเสร็จแล้ว



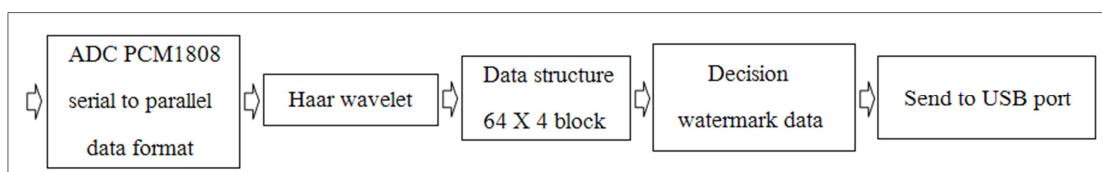
รูปที่ 5.12 วงจรด้านบนเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5.13 วงจรด้านล่างเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์

5.6 โปรแกรมการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA

โปรแกรมในส่วนของวงจรถอดลายน้ำจะทำงานตามแผนภาพในรูปที่ 5.14 โดยเริ่มจากส่วนของการรับข้อมูลสัญญาณเสียงจากภาครับสัญญาณเสียง PCM1808 เมื่อได้ข้อมูลสัญญาณเสียงก็จะถูกส่งให้ส่วนของการแปลงเวฟเลตก่อนเข้าสู่ขั้นตอนของการเก็บข้อมูลก่อนการเปรียบเทียบข้อมูลลายน้ำ บิต ‘1’ หรือ ‘0’ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการจัดการข้อมูลก่อนส่งผ่านการเชื่อมต่อ USB เพื่อส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์

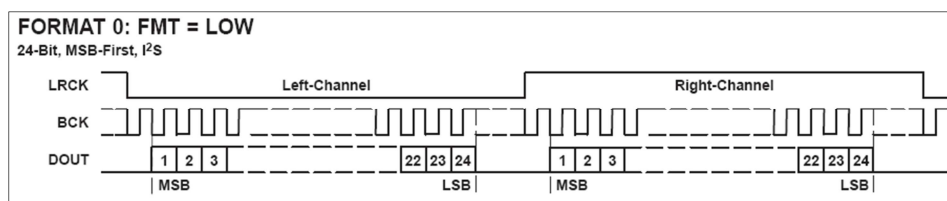


รูปที่ 5.14 แผนภาพการถอดลายน้ำโดยอุปกรณ์ FPGA

ในการรับข้อมูลจากวงจร PCM1808 จะต้องมีการควบคุมการทำงานของวงจรซึ่งมีขาควบคุมสองส่วน คือขา FMT ใช้ในการกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูล ขา MD1 และ MD0 ใช้ในการกำหนดโหมดการทำงานพร้อมทั้ง กำหนดความถี่ของการชักตัวอย่าง (Sampling frequency)

ตารางที่ 5.1 การกำหนดค่าควบคุมการทำงานของ PCM1808

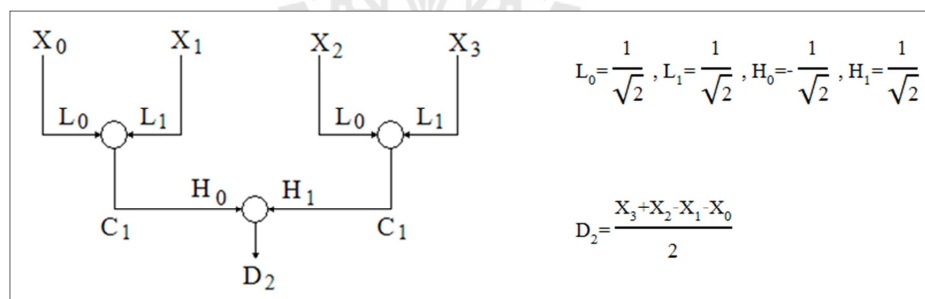
MD1 (Pin 11)	MD0 (Pin 10)	INTERFACE MODE
Low	Low	Slave mode (256 f _s , 384 f _s , 512 f _s auto detection)
Low	High	Master mode (512 f _s)
High	Low	Master mode (384 f _s)
High	High	Master mode (256 f _s)
FORMAT N0.	FMT (Pin 12)	FORMAT
0	Low	I ² S, 24-bit
1	High	Left-justified, 24-bit



รูปที่ 5.15 มาตรฐานการส่งข้อมูลแบบ I²S 24 bit

การกำหนดค่าการทำงานจะกำหนดให้วงจรทำงานที่ความถี่ Sampling 48 KHz และกำหนดให้มีการส่งถ่ายข้อมูลแบบ I²S 24 bit ดังนั้นการทำงานของโปรแกรมในส่วนนี้จึงเป็นการแปลงข้อมูลจากรูปแบบอนุกรมมาเป็นแบบขนานเพื่อส่งให้กับโปรแกรมแปลงเวฟเล็ด

ในการแปลงเวฟเล็ดแบบ Haar wavelet ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สองชุดคือ $L_{0,1}$ และ $H_{0,1}$ ในการแปลงเวฟเล็ดสองระดับ โดยในระดับแรกจะนำเอาค่า C_1 ซึ่งเป็นกลุ่มข้อมูลในย่านความถี่ต่ำมาแยกเอาค่า D_2 จะทำให้ได้กลุ่มข้อมูลในย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำซึ่งเป็นกลุ่มที่มีลายน้ำฝังอยู่ ผลที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ขั้นตอนการเก็บในหน่วยความจำก่อนนำไปใช้ในการตัดสินใจค่าข้อมูลบิตของลายน้ำ

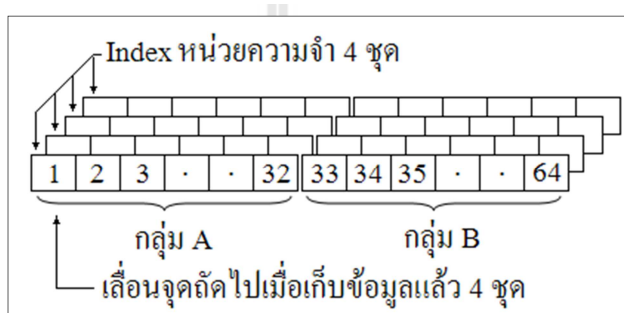


รูปที่ 5.16 การแยกย่านความถี่กลางก่อนไปทางต่ำโดยวิธีการของ Haar wavelet

ก่อนการตัดสินใจข้อมูลบิตของลายน้ำจะต้องการจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจเนื่องการถอดลายน้ำด้วยการค้นหาที่ละจุด Sampling ข้อมูลลายน้ำที่ถูกต้องจะปรากฏขึ้นเมื่อครบรอบ 4 จุด Sampling ซึ่งได้อธิบายในหัวข้อ 4.2 ที่ผ่านมา ดังนั้นข้อมูลที่จะนำมาจัดเรียงเพื่อให้ได้ขนาดของหน้าต่าง 64 จุด จึงต้องจัดออกเป็นกลุ่มข้อมูล 4 กลุ่ม ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการตัดสินใจตามอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งจะมีการตัดสินใจจะดำเนินการทีละกลุ่มด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนขนาด 32 จุดข้อมูลกำหนดเป็นกลุ่ม A และกลุ่ม B เปรียบเทียบกันระหว่างสองกลุ่มตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดขึ้น เช่นขนาดของกลุ่ม A มากกว่า B ให้เป็นลายน้ำบิต '1' และถ้า

ขนาดของ B มากกว่า A ให้เป็นบิต '0' เมื่อได้ข้อมูลบิตลายน้ำแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการส่งข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านช่องสัญญาณการเชื่อมต่อแบบ USB

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะส่งข้อมูลบิตที่ได้เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ จะต้องรอให้ข้อมูลของบิตลายน้ำครบทั้ง 8 บิตก่อน เนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านช่องทาง USB จะต้องส่งข้อมูลขนาด 8 บิต ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการส่งข้อมูลจึงมีค่าเท่ากับ 6 Kbyte ต่อวินาที หรือข้อมูล 8 บิตจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เมื่อครบรอบที่ละ 4 จุด Sampling อย่างต่อเนื่อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนทางด้านโปรแกรมภายนอกที่ใช้อุปกรณ์ FPGA เป็นตัวประมวลผลหลัก



รูปที่ 5.17 อัลกอริทึมการจัดเรียงข้อมูล 4 กลุ่มภายหลังการแปลงเวฟเล็ด

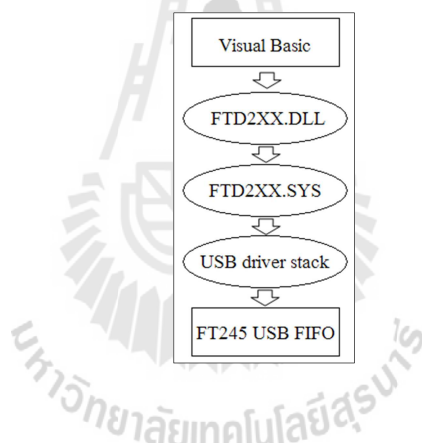


รูปที่ 5.18 การจัดเรียงข้อมูล 8 บิตก่อนส่งผ่านช่องสัญญาณการเชื่อมต่อแบบUSB

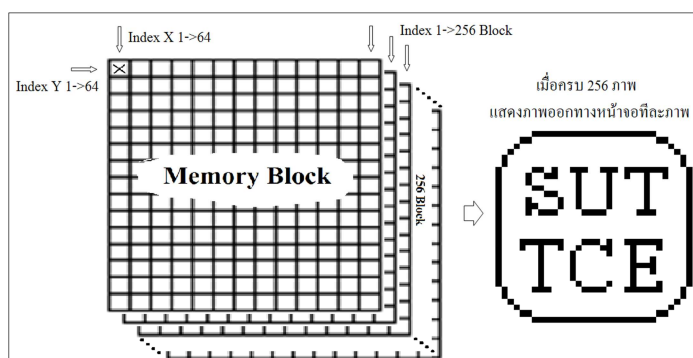
5.7 โปรแกรมแสดงผลการถอดลายน้ำด้วยคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลการถอดลายน้ำโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลหลักจะต้องทำการเขียนโปรแกรม Visual basic จัดการกับข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์ FPGA โดยการรับข้อมูลผ่านช่องทาง USB ในการเขียนจะใช้โมดูล D2XX ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Future technology devices international ltd (FTDI) เพื่อเป็นโมดูลที่ใช้ในการเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวจัดการการสื่อสารผ่านช่องทาง USB ด้วยชิพ FT245RL

ข้อมูลที่ได้มาจะทำการจัดเรียงใหม่เพื่อให้ได้ภาพลายน้ำในรูปแบบข้อมูล 2 มิติ เนื่องจากข้อมูลบิตลายน้ำที่ส่งมาในแต่ละบิตจะเป็นข้อมูลลายน้ำ 1 จุดของภาพที่เรียงต่อกันรอบละ 256 จุด ก่อนจะเป็นบิตลายน้ำในจุดถัดไปของภาพลายน้ำที่มีขนาด 64X64 พิกเซลการจัดเรียงดังกล่าวจะทำให้เกิดภาพลายน้ำทั้งหมด 256 ภาพตามรูปที่ 5.20 เมื่อได้ภาพลายน้ำมาทั้งหมดแล้วจึงแสดงภาพลายน้ำออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

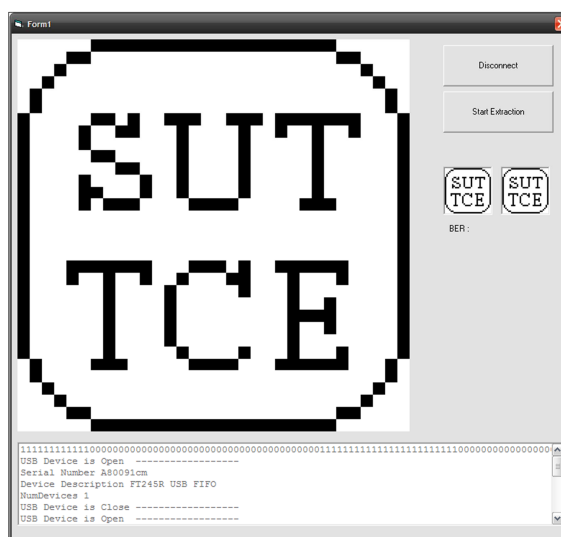


รูปที่ 5.19 แบบจำลองของโมดูล D2XX



รูปที่ 5.20 อัลกอริทึมการจัดเรียงภาพลายน้ำ 256 ภาพ

ส่วนของโปรแกรมการใช้งาน ได้ทำการออกแบบโปรแกรมให้มีปุ่มกดสำหรับใช้ในการเชื่อมต่อและเริ่มการอ่านข้อมูลจากพอร์ต USB นอกจากนี้ยังมีส่วนที่ใช้ในการแสดงผลเพื่อใช้ในการแสดงภาพลายน้ำที่ได้ในหน่วยความจำที่ถูกจัดเรียงเรียบร้อยแล้วทีละภาพโดยมีหน้าต่างโปรแกรมแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง

5.8 สรุป

บทนี้นำเสนอการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์สำหรับการถอดลายน้ำแบบเวลาจริง ในการออกแบบในส่วนฮาร์ดแวร์ จะเริ่มต้นทำงานด้วยการเปลี่ยนสัญญาณเสียงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลด้วยชิพ PCM1808 จากนั้นสัญญาณเสียงจะถูกประมวลผลในชิพ FPGA ตามกระบวนการถอดลายน้ำที่ได้ออกแบบขึ้น และส่งลายน้ำที่ได้ไปแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ด้วยชิพ FT245RL ส่วนโปรแกรมการถอดลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล มีด้วยกันอยู่สองส่วน คือ โปรแกรมที่ใช้ในส่วนของวงจรโดยใช้โปรแกรมภาษา Very-high-speed integrated circuits hardware description language (VHDL) ทำงานร่วมกับ Block diagram design บนโปรแกรม Quartus II Version 8.1 ของบริษัท Altera corporation ซึ่งเป็นบริษัทผลิตชิพ FPGA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และส่วนสุดท้ายโปรแกรมนำเสนอการแสดงผลลัพท์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ Visual basic ในการรับข้อมูลที่ได้จากวงจรผ่านการเชื่อมต่อทาง USB โดยข้อมูลที่รับมานั้น จะถูกทำการจัดเรียงและแสดงผลออกเป็นภาพลายน้ำทางหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในลักษณะของสัญญาณเสียงดิจิทัล

บทที่ 6

ผลการทำางนงจรรอดลายน้้าแบบเวลาจริง

6.1 บทนำ

ในการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการถอดลายน้้าแบบเวลาจริง จะดำเนินการออกแบบให้มีการทำงานของอัลกอริทึมที่ไม่สนใจจุดเริ่มต้นในการถอดลายน้้าหรือจุดเริ่มต้นของภาพลายน้้าที่ฝังอยู่ ซึ่งจะต้องทำการถอดลายน้้าทุกจุด Sampling ซึ่งผลที่ได้พบว่าทุกจุด Sampling ของสัญญาณเสียงจะปรากฏค่า BER ของภาพลายน้้าที่ถอดได้หนึ่งค่า ดังนั้นจึงต้องมีการทำงานของโปรแกรมที่เร็วมาก และก่อนที่ทำการทดลองโดยวงจร FPGA เพื่อประมวลผลแบบเวลาจริงได้ทำการจำลองการทำงานและแสดงผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อพิสูจน์ถึงความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้

6.2 ผลการจำลองอัลกอริทึมโดยโปรแกรม MATLAB

เพื่อให้ทราบถึงความถูกต้องของอัลกอริทึม ผู้วิจัยได้จำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งในการจำลองผลดังกล่าวจะใช้รูปแบบเพลงตามตารางที่ 6.1 ทดสอบเสียงโดยใช้ค่า Alpha ในการทดสอบอยู่ที่ 1.357 ขนาดหน้าต่างเท่ากับ 64 ชนิดของข้อมูลสัญญาณเสียง PCM 48 KHz 16 Bits Mono ความยาวของเพลงประมาณ 1 นาที และภาพลายน้้าที่ทำการทดสอบมีขนาด 64X64 Pixel หรือ 4,096 บิต

6.2.1 การทดสอบคุณภาพของสัญญาณเสียง

ในการทดสอบคุณภาพเสียงได้ทำการฝังลายน้้าตามอัลกอริทึมที่ออกแบบขึ้นและคำนวณค่า SNR เทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.1 โดยมีค่าเฉลี่ย SNR ที่ประมาณ 26.04365 dB ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ IFPI กำหนด

นอกจากการทดสอบคุณภาพโดยการคำนวณ SNR แล้วยังได้ทำการทดสอบคุณภาพเสียงในห้องสตูดิโอของศูนย์นวัตกรรม และเทคโนโลยีการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ผู้ร่วมประเมินคุณภาพเสียงจำนวน 6 คน โดยมีเกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียงแสดงในตารางที่ 6.2 และผลการประเมินแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบคุณภาพของสัญญาณที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ

รูปแบบเพลง	SNR (dB)
Dance	26.7810
Pop	27.3661
Rock	23.3226
ลูกทุ่ง	27.9860
ขลุ่ยบรรเลง	27.5180
เซิ้งโปงลาง	23.2882
ค่าเฉลี่ย	26.04365

ตารางที่ 6.2 เกณฑ์การประเมินคุณภาพเสียง (Mean opinion score, MOS)

ระดับ	รายละเอียด
5	ดีมาก เสียงที่ได้เหมือนเสียงต้นฉบับ (Excellent)
4	ดี (Good)
3	พอใช้ (Fair)
2	มีการรบกวน (Poor)
1	มีการรบกวนมาก (Bad)

ตารางที่ 6.3 ผลการประเมินคุณภาพเสียง

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	ผลการทดสอบ(คนที่/ผลประเมิน)						ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	
Dance	26.7810	4	5	4	4	4	5	4.33
Pop	27.3661	5	4	3	4	5	4	4.17
Rock	23.3226	4	5	4	5	4	4	4.33
ลูกทุ่ง	27.9860	5	4	4	4	5	5	4.50
ขลุ่ยบรรเลง	27.5180	5	4	5	5	5	5	4.83
เซิ้งโปงลาง	23.2882	4	5	5	5	5	5	4.83

จากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นว่า การทำลายน้ำสัญญาณเสียงมีผลกระทบต่อเพลงในรูปแบบที่มีองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่มาก เช่นรูปแบบเพลง Dance Pop Rock ลูกทุ่ง

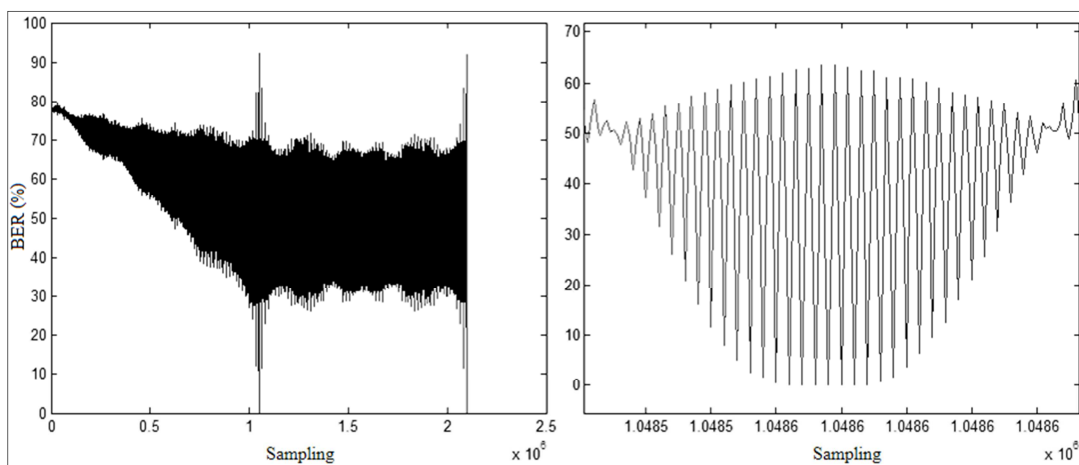
ซึ่งทำให้คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงข้างต้นดีกว่ารูปแบบเพลงที่มีองค์ประกอบของสัญญาณเสียงที่น้อย แต่อย่างไรก็ดีผลค่าเฉลี่ยรวมของการประเมินสัญญาณเสียงเพลงในทุกรูปแบบอยู่ที่ 4.498 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ระดับที่ดี (Good) และมีแนวโน้มไปทางระดับดีมาก หรือมีคุณภาพเสียงที่ได้เหมือนเสียงต้นฉบับ (Excellent)

6.2.2 การทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

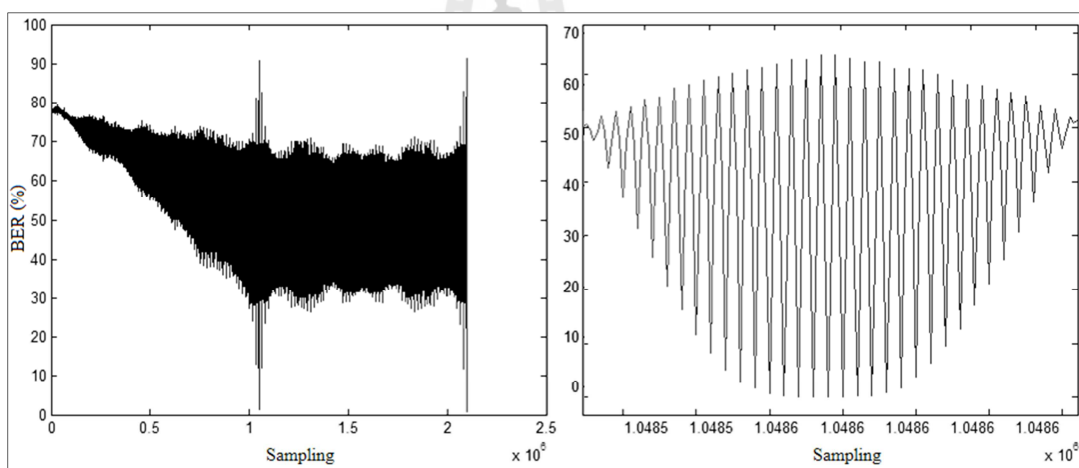
ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำจริงโดยการทดลองใช้รูปแบบเพลง Pop ผ่านการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสัญญาณลายน้ำมีการฝังภาพลายน้ำเป็นจำนวนสองภาพ ขนาด 64X64 Pixel หรือ 4,096 บิตค่า Alpha ในการทดสอบอยู่ที่ 1.357 ทำให้ได้ค่า SNR เท่ากับ 27.3661 dB จากผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในรูปของกราฟค่า BER ในรูปที่ 6.1 ถึง 6.6 ทำให้ทราบว่าอัลกอริทึมสามารถค้นพบภาพลายน้ำเมื่อจำนวนจุด Sampling ผ่านไปจนเข้าถึงจำนวนทั้งหมดที่ใช้ฝังลายน้ำหนึ่งภาพ โดยคำนวณจุดที่ใช้ได้จาก จำนวน Pixel ภาพลายน้ำ 4,096 X ขนาดหน้าต่าง 64 X4 มีค่าเท่ากับ 1,048,576 จุด

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำจากการโจมตีแบบต่าง ๆ

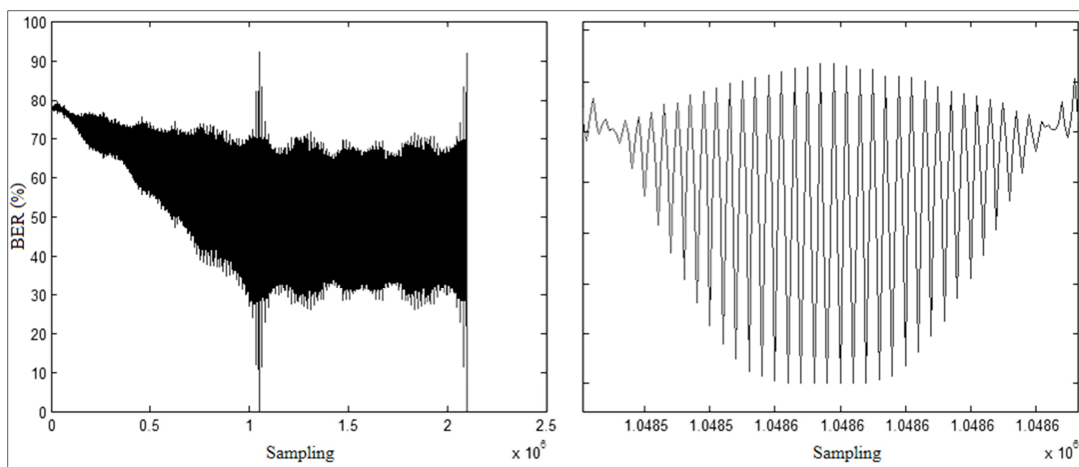
รูปแบบเพลง	BER (%)					
	No Attack	Noise Addition	High pass filter	Low pass filter	Compression MP3 64 Kbps	ADC&DAC
Dance	0.00000	0.58590	0.00000	3.78417	0.90332	0.00000
Pop	0.00000	0.46390	0.00000	2.92968	0.09765	0.00000
Rock	0.00000	0.00000	0.00000	0.63476	0.39062	0.00000
ลูกทุ่ง	0.00000	0.02440	0.00000	3.97949	0.02441	0.00000
ขลุ่ยบรรเลง	0.00000	0.78130	0.00000	4.41894	0.00000	0.00000
เซิ้งโปงลาง	0.00000	0.04880	0.00000	0.46386	0.14648	0.00000



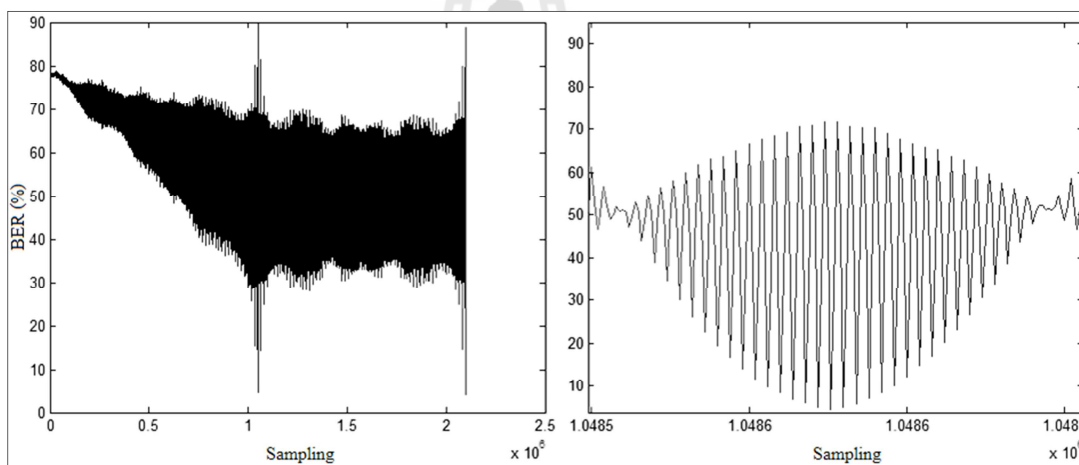
รูปที่ 6.1 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำแบบไม่มีการ โจมตี รูปแบบเพลง Pop



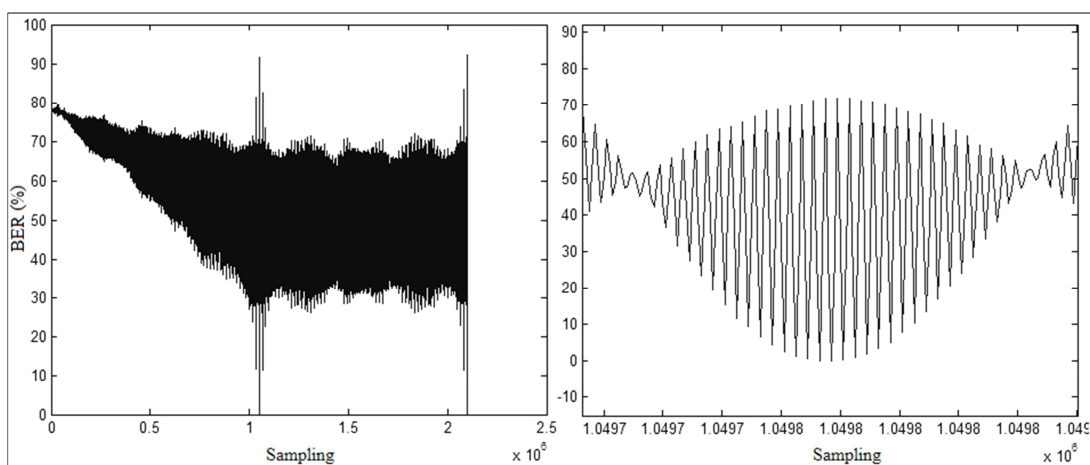
รูปที่ 6.2 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำโดยการ โจมตีแบบ Noiseรูปแบบเพลง Pop



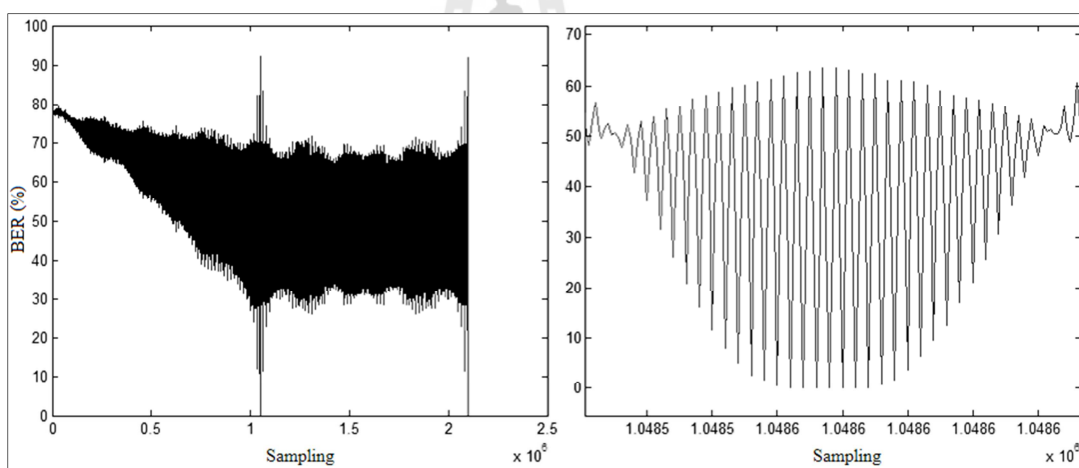
รูปที่ 6.3 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำโดยการ โจมตีแบบ High pass รูปแบบเพลง Pop



รูปที่ 6.4 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำโดยการ โจมตีแบบ Low pass รูปแบบเพลง Pop

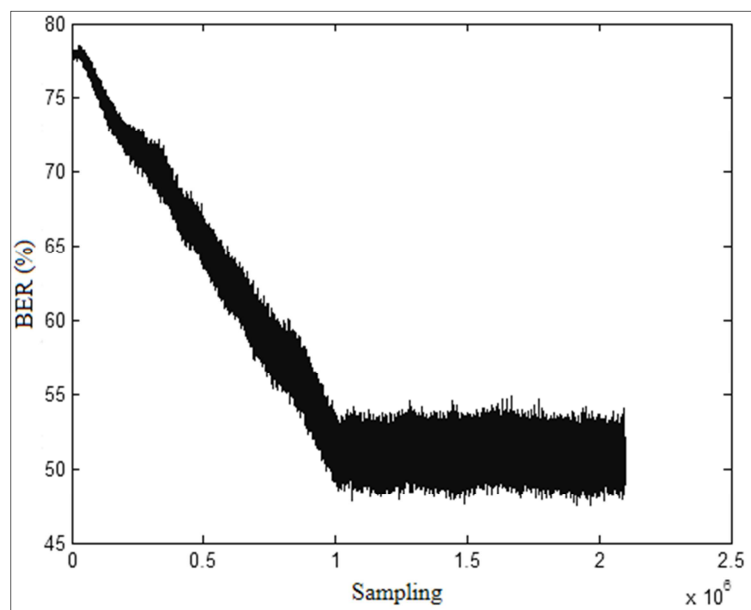


รูปที่ 6.5 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำโดยการ โจมตีแบบ MP3 รูปแบบเพลง Pop

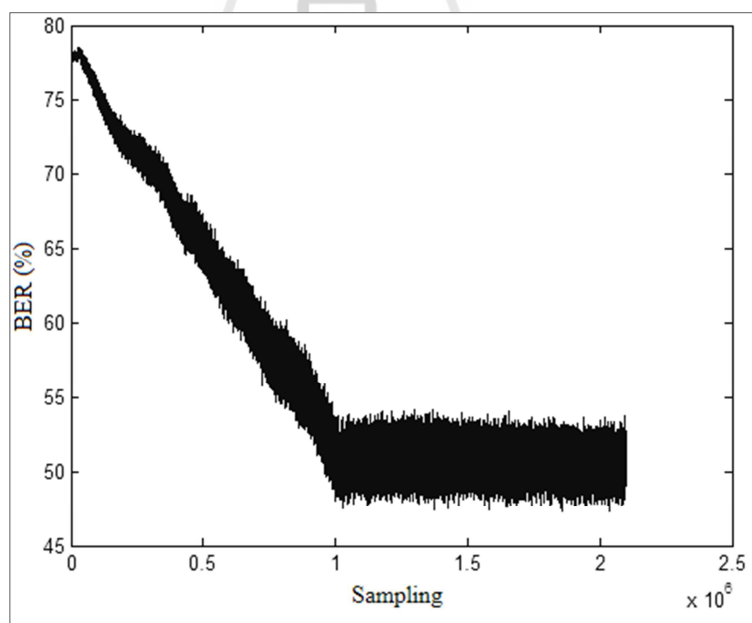


รูปที่ 6.6 กราฟค่า BER จากการถอดลายน้ำโดยการ โจมตีแบบ ADC&DAC รูปแบบเพลง Pop

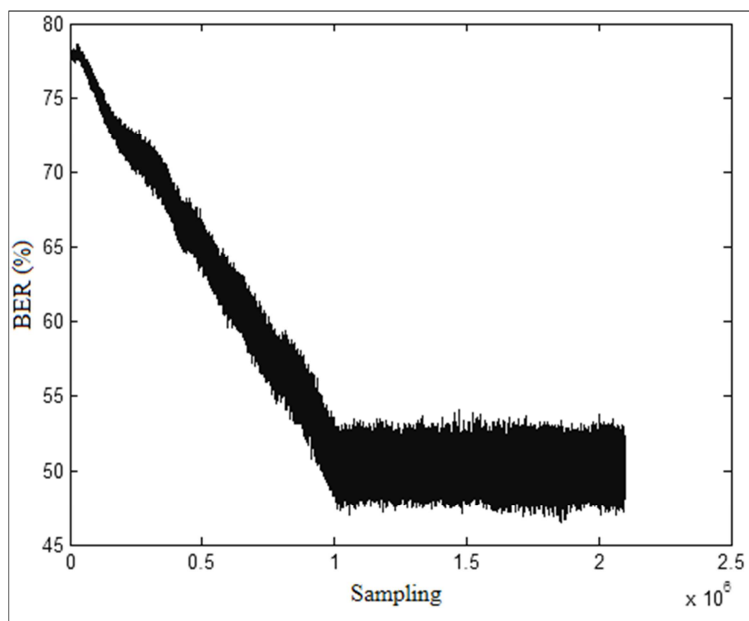
ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงซึ่งในกรณีนี้จะใช้สัญญาณเสียงในแต่ละรูปแบบที่ไม่ได้ฝังลายน้ำ มาทำการทดสอบกับอัลกอริทึมการถอดลายน้ำในแบบเวลาจริง เพื่อสังเกตพฤติกรรมของค่า BER ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6.7 ถึง 6.12



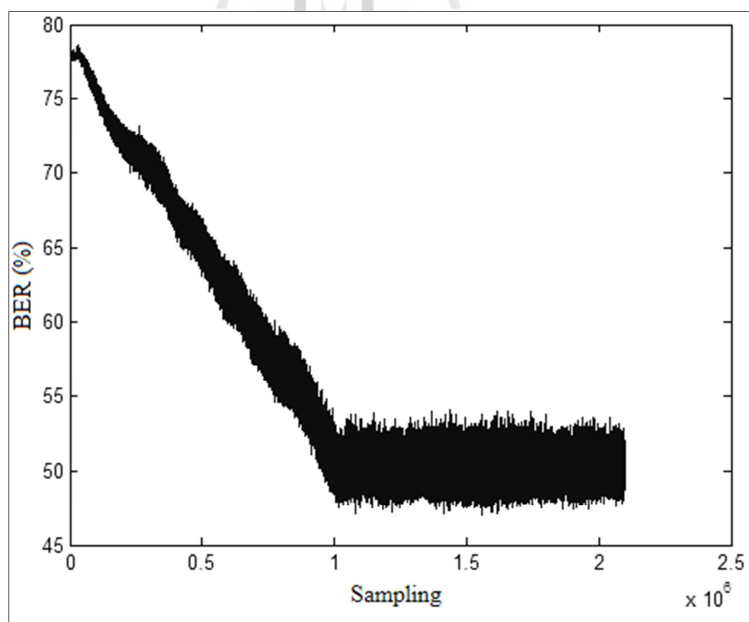
รูปที่ 6.7 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Dance



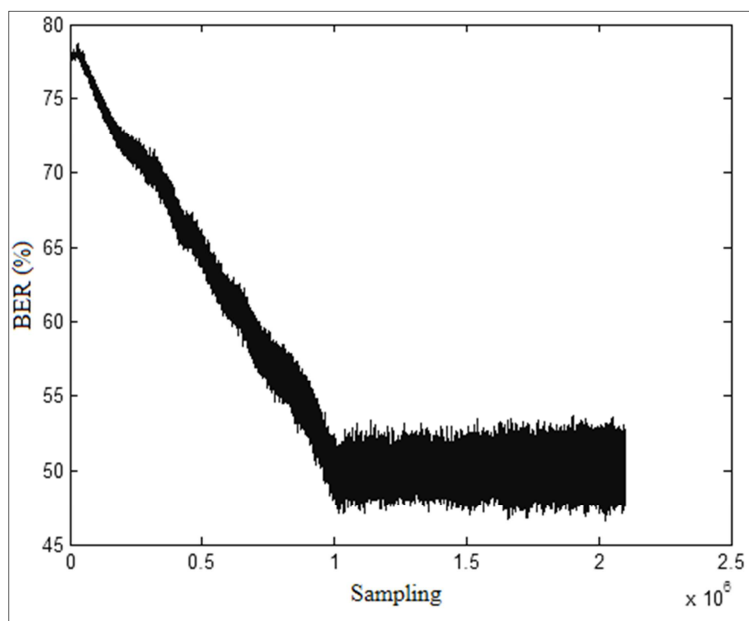
รูปที่ 6.8 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Pop



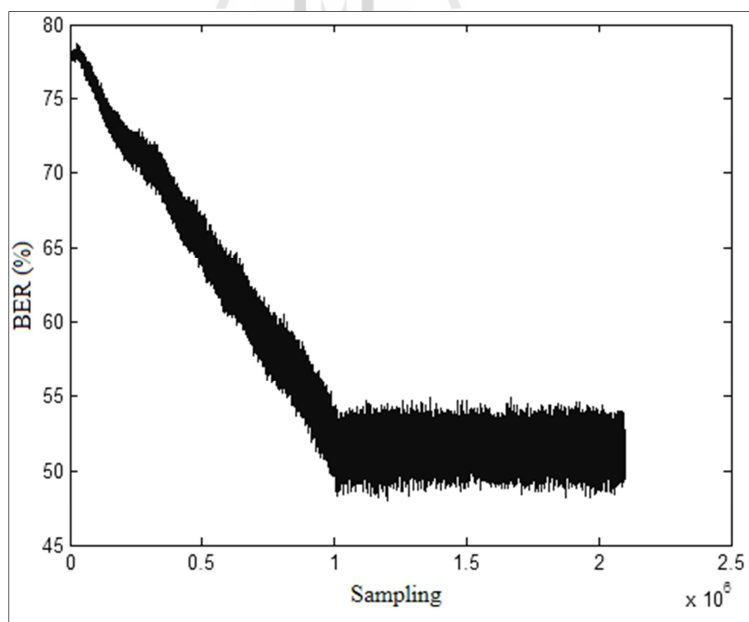
รูปที่ 6.9 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลง Rock



รูปที่ 6.10 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง



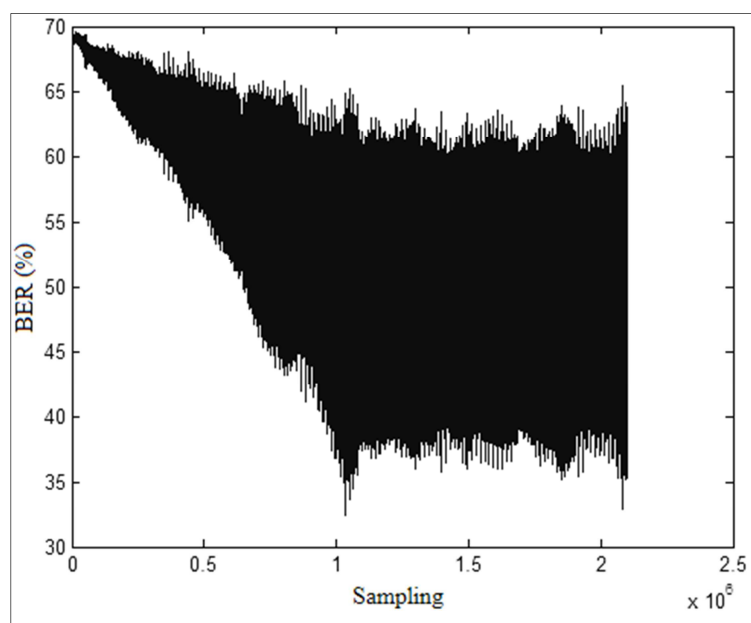
รูปที่ 6.11 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ําจริงด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง



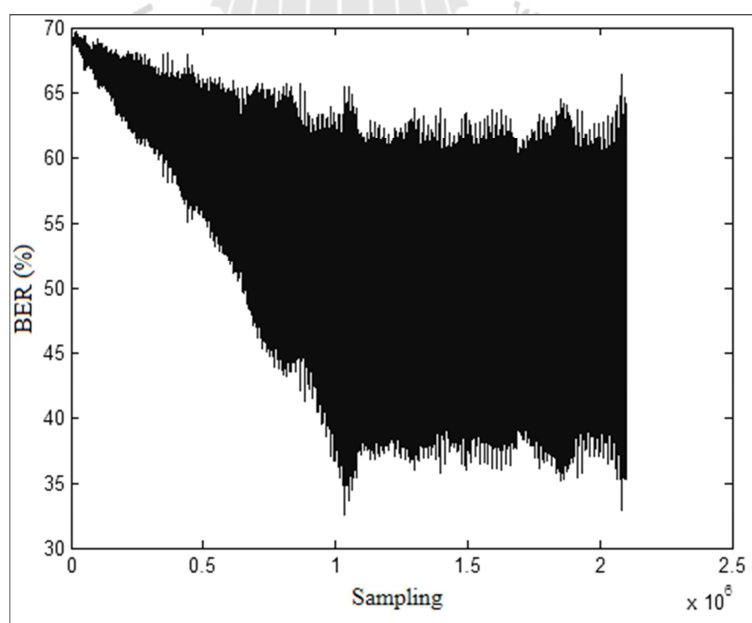
รูปที่ 6.12 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ําจริงด้วยรูปแบบเพลงเชิงโปงลาง

ผลการถอดลายน้ําในกรณีที่มิมีสัญญาณลายน้ําแต่ไมใช้ลายน้ําที่ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อต้องการทดสอบว่าอัลกอริทึมที่คิดค้นขึ้นสามารถคัดแยกสัญญาณลายน้ําได้ถูกต้องหรือไม่ ถ้ามีสัญญาณลายน้ําในสัญญาณเสียงที่กำลังทดสอบ แต่ไมใช้ลายน้ําที่กำลังค้นหา โปรแกรมจะต้อง

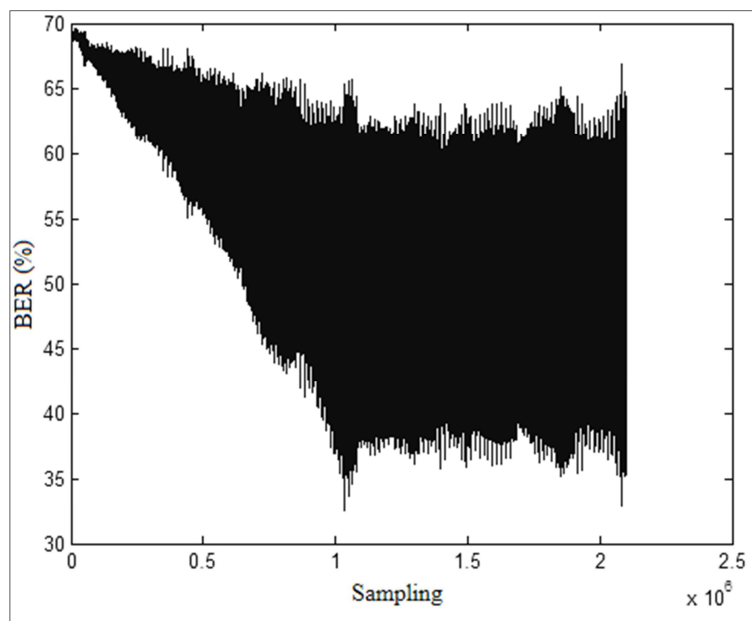
สามารถรายงานการตรวจจับลายน้ำได้ถูกต้องโดยไม่เกิดความคลาดเคลื่อนตามทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณ (Signal detection theory)



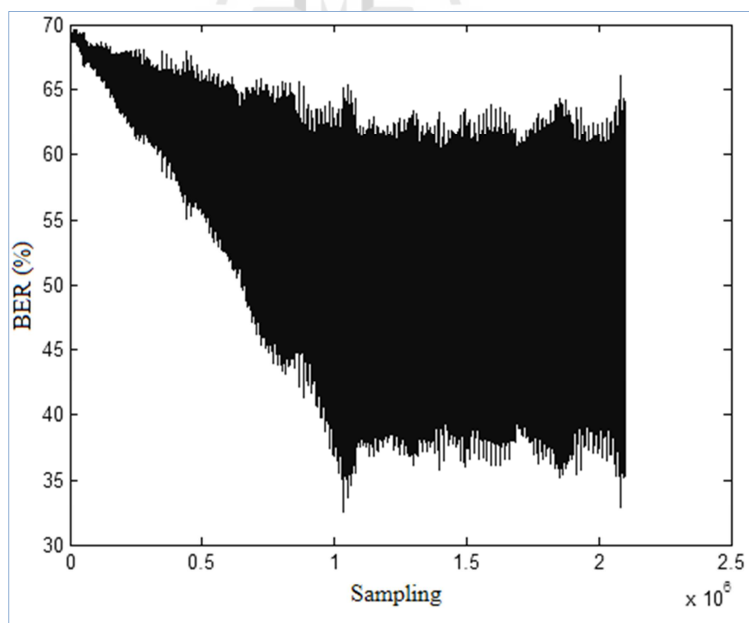
รูปที่ 6.13 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Dance



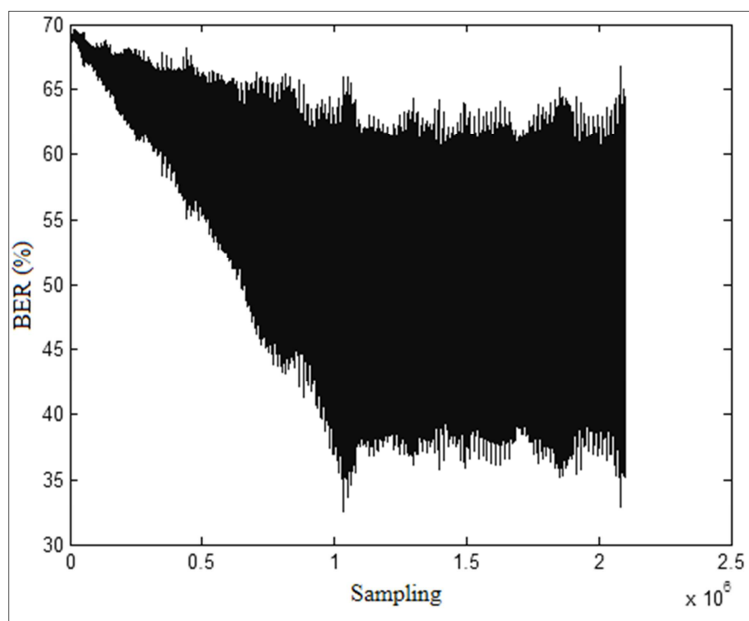
รูปที่ 6.14 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Pop



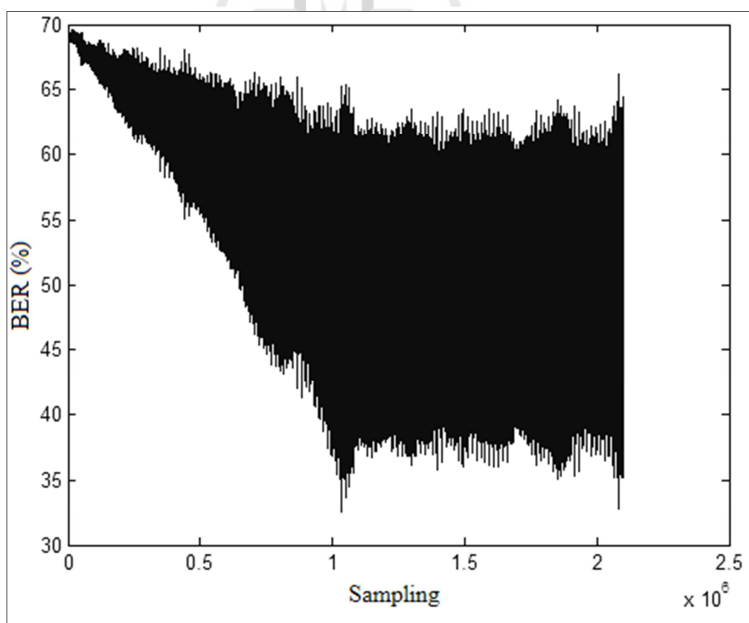
รูปที่ 6.15 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลง Rock



รูปที่ 6.16 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงลูกทุ่ง



รูปที่ 6.17 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงขลุ่ยบรรเลง



รูปที่ 6.18 กราฟค่า BER ในกรณีที่ไม่ใช้ลายน้ำที่ถูกต้องด้วยรูปแบบเพลงเซิ้งโปงลาง



ก. ลายน้ำที่ถอดได้



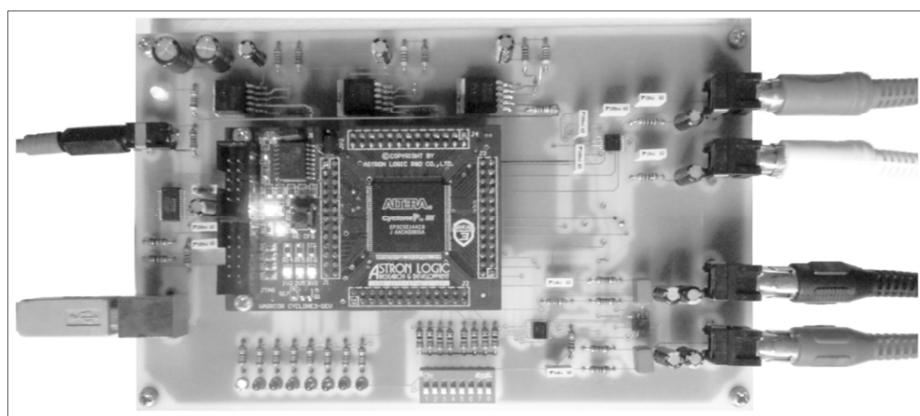
ข. ลายน้ำที่ต้องการ

รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบภาพลายน้ำที่ถอดได้และภาพลายน้ำที่ต้องการ

จากรูปที่ 6.13 ถึง 6.18 เป็นการถอดลายน้ำโดยภาพลายน้ำที่ได้ไม่ใช่ภาพลายน้ำที่ต้องการ ดังรูปที่ 6.19 ซึ่งจะสังเกตได้ว่ากราฟของ BER ที่แสดงนั้นจะมีการกระจายตัวสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการถอดลายน้ำ ซึ่งค่าของ BER อยู่ในช่วง 70% ถึง 30% แต่อย่างไรก็ตามค่าของ BER ไม่สามารถลดลงต่ำกว่า 30% หรือลดลงไปเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่สามารถตรวจหาภาพลายน้ำที่ถูกต้องได้

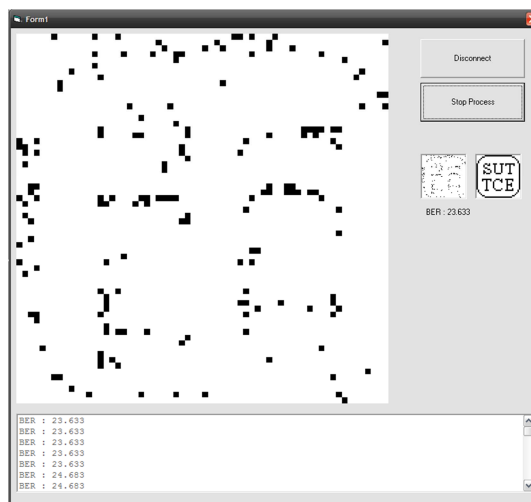
6.3 ผลการทดลองอัลกอริทึมโดยใช้ FPGA

การทดลองโดยการถอดลายน้ำด้วยวงจรประมวลผลแบบเวลาจริงจะมีการเชื่อมต่อโดยการนำเอาสัญญาณเสียงเชื่อมต่อทางอินพุตของวงจรและเชื่อมต่อสาย USB เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรมแสดงผลเพื่อให้โปรแกรมเชื่อมต่อกับวงจร



รูปที่ 6.20 การเชื่อมต่อวงจรถอดลายน้ำ

กรณีที่ 1 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำจริง ในรูปที่ 6.21 ค่า BER = 23.633



รูปที่ 6.21 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำ

กรณีที่ 2 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่ไม่มีสัญญาณลายน้ำจริงซึ่งสัญญาณเสียงที่ใช้จะไม่มีภาพลายน้ำฝังอยู่ ค่า BER ที่ได้มีค่าเท่ากับ 33.057 และภาพลายน้ำที่ได้จะเป็นลักษณะสัญญาณสุ่มซึ่งจะไม่มีเค้าโครงของภาพลายน้ำอยู่เลย



รูปที่ 6.22 โปรแกรมในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่ไม่มีภาพลายน้ำ

กรณีที่ 3 ผลการถอดลายน้ำในกรณีที่มีสัญญาณลายน้ำแต่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง ในรูปที่

6.23 ค่า BER = 36.157



รูปที่ 6.23 ในขณะที่ทำงานด้วยสัญญาณเสียงที่มีภาพลายน้ำแต่ไม่ใช่ลายน้ำที่ถูกต้อง

ทางด้านผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากวงจรประมวลผลแบบเวลาจริง ผลที่ได้ไม่ค่อยชัดเจนมากนักเนื่องจากการประมวลผลต้องมีการวนลูปอย่างน้อย 4,096 รอบใน 1/48 KHz หรือ 20.833μs ในการใช้ภาพลายน้ำขนาด 64 x 64 บิตซึ่งการประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำได้จึงทำให้การแสดงค่า BER จะต้องใช้วิธีการสุ่มภาพลายน้ำขึ้นมาเพื่อแสดงออกทางหน้าจอ ดังนั้นจึงทำให้การแสดงผลไม่ชัดเจน

6.4 สรุป

เนื่องจากอัลกอริทึมการถอดลายน้ำที่ได้ออกแบบใหม่ เพื่อให้ค้นหาภาพลายน้ำในกรณีที่ไม่ทราบตำแหน่งของภาพลายน้ำที่ฝังอยู่ ได้มีการออกแบบเพื่อให้สามารถทำงานแบบแบบเวลาจริงได้ ดังนั้นการประมวลผลจึงมีการลดขนาดการวนลูปในหลายส่วนโดยการใช้เทคนิคการจักรการหน่วยความจำเข้าช่วย และในการคำนวณจะใช้ตัวแปรชนิดตัวเลขจำนวนเต็ม ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการปัดจุดทศนิยมเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงทำให้การถอดลายน้ำที่ได้มีผลที่ไม่ดีเท่าที่ควร และในส่วนของการทำงานในแบบเวลาจริงนั้น การประมวลผลในขั้นตอนสุดท้ายจำเป็นต้องมีการวนลูปถึง 4,096 รอบใน 20.833μs ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่สามารถที่จะทำได้ ดังนั้นการแสดงผลที่เกิดจากการสุ่มค่า BER ออกมาแสดงนั้นจึงไม่สามารถหาค่าที่ BER ดีที่สุดออกมาแสดงได้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอ การศึกษาและการวิเคราะห์เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ด้วยวิธีการสร้างลักษณะเฉพาะทางด้านแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลตที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำก่อนไปทางความถี่สูงที่ได้จากกระบวนการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต และใช้วิธีการแบ่งกลุ่มของข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มตามขนาดที่ได้กำหนดขึ้น เพื่อใช้ในการปรับขนาดของค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มให้มีปริมาณที่แตกต่างกันตามเงื่อนไข

การทดสอบคุณภาพของลายน้ำจะวัดจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) และการประเมินคุณภาพเสียงโดยใช้วิธีการฟังในห้องสตูดิโอและทำการประเมินค่าคุณภาพเสียงตามสเกลของ MOS (Mean opinion score) ส่วนในการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำดิจิทัล ใช้วิธีการคำนวณค่า NC และค่า BER ที่ได้จากการเปรียบเทียบความถูกต้องของภาพสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการถอดเทียบกับภาพลายน้ำต้นฉบับ ทั้งนี้ก่อนการถอดลายน้ำสัญญาณลายน้ำต้องผ่านการโจมตีด้วยรูปแบบวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบความทนทานของลายน้ำ และการถอดลายน้ำที่ออกแบบไว้ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ออกแบบไว้สองแบบคือการถอดลายน้ำโดยรู้ตำแหน่งที่ถูกต้องของลายน้ำที่ฝังอยู่ในข้อมูลสัญญาณเสียง และอีกแบบคือการถอดลายน้ำแบบไม่ทราบตำแหน่งเริ่มต้นทั้งนี้การถอดลายน้ำจะใช้อัลกอริทึมที่ออกแบบเพื่อถอดลายน้ำแบบวงจรถอดลายน้ำแบบเวลาจริง ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นได้นำเสนอและทำการทดลองการถอดลายน้ำทั้งสองแบบโดยจำลองในโปรแกรม MATLAB และในส่วนของวงจรถอดลายน้ำที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

7.2 สรุปผลการวิจัย

คุณภาพของลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ได้จากฝังลายน้ำตามเทคนิควิธีที่ได้ออกแบบขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความแรงแรงของสัญญาณลายน้ำ (α) ที่กำหนดขึ้น ถ้ากำหนดค่า α มากค่าของ SNR จะน้อย และถ้ากำหนดค่า α น้อยก็จะทำให้ค่าของ SNR มากขึ้นหรือทำให้คุณภาพของเสียงที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำดีขึ้น อย่างไรก็ตามการทำให้คุณภาพของลายน้ำดีขึ้นก็จะบั่นทอนค่าความทนทานของลายน้ำให้น้อยลง ดังนั้นการเลือกค่า α ที่เหมาะสมในการฝังลายน้ำจะขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ในการศึกษาพบว่าค่าความทนทานของลายน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าของ SNR เมื่อกำหนดค่า α ที่คงที่ในรูปแบบของเพลงที่แตกต่างกันจะสังเกตได้ว่าค่าของ SNR จะไม่เท่ากัน แต่ค่าความทนทานที่ได้จะดีขึ้นเมื่อค่า SNR ดีขึ้นในขณะที่ค่า α กำหนดให้เท่ากันหมด ดังนั้นการฝังลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลตามเทคนิควิธีการนี้จึงควรฝังสัญญาณลายน้ำโดยคำนึงถึงค่าของ SNR

มากกว่าค่า Alpha ซึ่งในหนึ่งเพลงอาจจะใช้ค่า Alpha หลายค่าขึ้นอยู่กับกลุ่มข้อมูลในหนึ่งหน้าต่าง ที่นำมาฝังลายน้ำ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการค่า SNR เท่า 25 dB ให้ดำเนินการโดยการค้นหาว่าในแต่ละหน้าต่างจะใช้ค่า Alpha ด้วยค่าเท่าไร เพื่อให้ในแต่ละหน้าต่างนั้นมีค่า SNR โดยเฉลี่ยแล้วเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียงเท่ากันตลอดทั้งเพลงด้วย

การออกแบบอัลกอริทึมที่ทราบตำแหน่งของภาพลายน้ำ ทำให้ภาพลายน้ำที่ถอดได้มีคุณภาพที่สมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ดจะมีการกระทำด้วยกลุ่มก้อนข้อมูลในหนึ่งหน้าต่างพร้อมกัน และอัลกอริทึมมีการดำเนินการได้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้เพราะไม่ต้องคำนึงถึงการทำงานแบบเวลาจริง ดังนั้นการคำนวณข้อมูลทั้งในส่วนการแปลงเวฟเล็ดและในส่วนของการค้นหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลทั้งสองกลุ่มได้มีการคำนวณตัวเลขได้อย่างสมบูรณ์ ภาพลายน้ำที่ถอดได้จึงมีค่าความถูกต้องที่ดี หรือค่าของ BER น้อยมาก ส่วนอัลกอริทึมที่ไม่คำนึงถึงจุดเริ่มต้นในการถอดลายน้ำ จำเป็นต้องออกแบบโดยคำนึงถึงการทำงานแบบเวลาจริง ซึ่งอัลกอริทึมที่ออกแบบให้มีการจัดการกับหน่วยความจำเพื่อหลีกเลี่ยงการประมวลผลและความต้องการใช้หน่วยความจำที่มากเมื่อดำเนินการถอดลายน้ำโดยตรง และในส่วนการคำนวณทั้งทางด้านการแปลงเวฟเล็ดและทางด้านการคำนวณค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลก่อนการเปรียบเทียบมีการดำเนินการโดยใช้ตัวแปรแบบจำนวนเต็ม จึงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากการปัดจุดทศนิยม ผลการทดลองที่ได้จึงแตกต่างไปจากผลของอัลกอริทึมที่ทราบตำแหน่งการฝังลายน้ำ ผลการทดลองในบทที่ 6 ได้แสดงกราฟค่า BER ที่เข้าสู่ค่า 0 เมื่อค้นพบภาพลายน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าสัญญาณเสียงที่กำลังทดสอบมีลายน้ำฝังอยู่ โดยการแสดงผลของค่า BER อยู่ในรูปของกราฟ ในการตรวจจับลายน้ำที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริงนั้นการแสดงผลค่า BER แต่ละ Sampling ต้องมีการคำนวณค่า BER ตลอดทุก Sampling โดยมีการคำนวณแบบวนลูปเพื่อหาค่า BER อย่างน้อย 4,096 รอบในหนึ่ง Sampling ในกรณีใช้ภาพลายน้ำ 64X64 บิต ทำให้การดำเนินการแบบเวลาจริงจึงเป็นไปได้ยากที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำงานได้ทัน ซึ่งถือเป็นจุดอ่อนของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

อย่างไรก็ตามผลจากการทดลองที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการทำลายน้ำในงานวิจัยนี้มีคุณภาพเสียงที่ดีตามมาตรฐาน IFPI และมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถที่จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมการทำลายน้ำแบบเวลาจริงต่อไป

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

จากผลการวิจัยเทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลที่ใช้การแก้ไขของค้ประกอบหลักของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ดของสัญญาณเสียง พบว่าสัญญาณลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีได้เป็นอย่างดี ดังนั้นแนวทางการพัฒนาต่อควรทดลองฝังโดยการแก้ไขของค้ประกอบย่านความถี่ต่าง ๆ ของสัญญาณเสียง การปรับเปลี่ยนของค้ประกอบด้านความถี่ของสัญญาณเสียงจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันไป จะทำให้มีข้อเด่นและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป ส่วนทางด้านอัลกอริทึม

การประมวลผลเพื่อใช้ในการถอดลายน้ำในแบบเวลาจริงก็สามารถปรับเปลี่ยนให้มีความสามารถที่ดีขึ้นได้โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณ หรือทำการปรับเปลี่ยนมาใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีสมรรถนะสูงในการทำงานเพื่อประมวลผลให้ทันทุก ๆ จุดของสัญญาณก็จะทำให้การตรวจจับสัญญาณลายน้ำมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Takahashi, A., Nishimura, R., and Suzuki, Y. (2005). Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques. *IEEE Trans. Signal Processing*. 53(2): 806 - 815.
- [2] Xiang, S., and Huang, J., (2006). Analysis of D/A and A/D Conversions in Quantization-based Audio Watermarking. *International Journal of Network Security*. 3: 230–238.
- [3] Sriyingyong, N., and Attakitmongcol, K. (2006). Wavelet-Based Watermarking Using Adaptive Tabu Search. *International Symposium on Wireless Pervasive Computing*. 16 - 18
- [4] Liu, H., Zheng, X., and Wang, Y. (2007). Dwt-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization. *IEEE Conf. Computer and Information Technology*. 745 - 748
- [5] Lanxun, W., Chao, Y., and Jiao, P. (2007). An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain. *ICEMI Conf. Electronic Measurement and Instruments*. 2-423 - 2-425
- [6] Movassagh, M., and Shirazi, A.A.B. (2008). A Novel Method for Real-time Audio Watermarking Using Wavelet Transform. *CCECE Conf. Electrical and Computer Engineering*. 83 - 88.
- [7] Shao, Y., Wu, G. and Lin, X. (2001). A Wavelet Based Adaptive Watermarking Algorithm. *ICII Conf. Info-tech and Info-net*. 3: 384 – 389.
- [8] Xu, C., Wu, J., and Sun, Q. (1999). Digital Audio Watermarking and Its Application in Multimedia Database. *ISSPA Conf. on Signal Processing and its Applications*. 1: 91 -94.
- [9] Cui, L., Wang, S. and Sun, T. (2003). The Application of Binary Image in Digital Audio Watermarking. *Neural Networks and Signal Processing*. 2: 1497 – 1500.
- [10] Bassia, P., Pitas, I., and Nikolaidis, N. (2001). Robust audio watermarking in the time domain. *IEEE Trans. Multimedia*. 3(2): 232 - 241
- [11] Cox, I.J., Kilian, J., Leighton, F.T., and Shamoon, T. (1997). Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia. *IEEE Trans. Image Processing*. 6(12): 1673 - 1687.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลแบบทนทานโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต

A Robust Digital Audio Watermarking Based-on Wavelet Transform

พทุธราวุฒิ ลีกุลธร และ ประโยชน์ คำสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ด.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4394 โทรสาร 0-4422-4220 E-mail: Cropw@Hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำดิจิทัลบนข้อมูลสัญญาณเสียงด้วยวิธีการฝังลายน้ำในสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตด้านความถี่กลางก่อนไปทางความถี่ต่ำโดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลที่ได้จากสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเล็ตเพื่อให้มีความสามารถต้านทานต่อการรบกวนการทางสัญญาณต่างๆ การบีบอัดข้อมูลและการเปลี่ยนรูปแบบของสัญญาณ ซึ่งเทคนิคนี้ไม่ต้องใช้ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับในการถอดลายน้ำ ผลการทดลองพบว่าสัญญาณเสียงที่ฝังลายน้ำดิจิทัลมีคุณภาพสูงและลายน้ำดิจิทัลสามารถทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ตามผลการทดลองที่ปรากฏในบทความนี้

Abstract

In this paper, a robust watermarking scheme for digital audio signal is proposed. The watermarks are embedded into the middle-low frequency coefficients in discrete wavelet transform domain to achieve robust performance against common signal processing procedures, signal compression and signal conversion. The embedding technique is based on comparing the mean of data segment of wavelet coefficient and this technique does not require the original audio signal in the watermark extraction. The experimental results show that the proposed scheme yields the watermark audio signal with high quality and the watermark survives to most of the attacks which were included in this study.

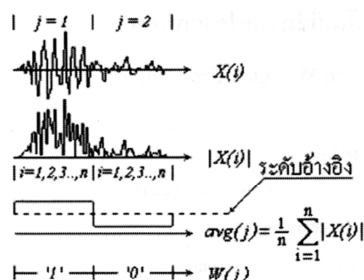
1. บทนำ

การทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลคือการเพิ่มความเป็นเอกลักษณ์ลงในข้อมูลสัญญาณเสียง โดยอาศัยเทคนิคการทำลายน้ำดิจิทัลด้วยวิธีการต่างๆ และอยู่ในกรอบมาตรฐานของ International Federation of the Phonographic Industry (IFPI) [1] ซึ่งกำหนดให้ลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลต้องมีค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ไม่ต่ำกว่า 20 dB เมื่อเทียบกับสัญญาณเสียงต้นฉบับ และความจุลายน้ำต้องไม่ต่ำกว่า 20 bps ภายใต้กรอบมาตรฐานนี้ ลายน้ำจำเป็นต้องทนทานต่อผลกระทบหรือเรียกว่าการโจมตีในรูปแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อความ

เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งนอกจากการนำลายน้ำไปใช้เกี่ยวข้องกับงานทางด้านลิขสิทธิ์แล้ว ยังสามารถใช้ในการตรวจจับสัญญาณเสียงที่มีลายน้ำฝังอยู่ได้ ซึ่งลายน้ำต้องมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก (D to A & A to D Conversions) มากเป็นพิเศษ

เทคนิคการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัลในปัจจุบัน มีการทำลายน้ำที่สร้างเงื่อนไขจากระดับของการทำ Quantization ในแต่ละจุดข้อมูล [1] รวมไปถึงค่าเฉลี่ยของระดับการทำ Quantization ในกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่ม [2] ซึ่งค่าของการทำ Quantization จะบ่งบอกถึงลักษณะข้อมูลลายน้ำว่าเป็นบิต '0' หรือบิต '1' และผลจากเทคนิคนี้ทำให้ทราบว่า ลายน้ำมีความทนทานต่อการรบกวนการเปลี่ยนแปลงทางข้อมูลเป็นอย่างดี เช่น การบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression แต่เมื่อผ่านการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อกพบว่า มีการโจมตีอีกรูปแบบคือ การปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ [1] โดยเป็นผลพวงจากการส่งถ่ายสัญญาณเสียงในรูปแบบแอนะล็อก ส่งผลให้เทคนิคการทำลายน้ำจากการทำ Quantization มีความทนทานต่อการโจมตีรูปแบบนี้ไม่ดีเท่าที่ควร และหากแก้ไขโดยการให้เทคนิคของการบิดเบือนเฟสของสัญญาณเสียง [3] เพื่อหลีกเลี่ยงการโจมตีโดยการปรับเปลี่ยนแอมพลิจูด แต่ในขั้นตอนการถอดลายน้ำ ของเทคนิคที่ใช้เฟสของสัญญาณเสียงเป็นเงื่อนไขนั้น จำเป็นต้องใช้เฟสอ้างอิงจากข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ จึงไม่สะดวกในการนำมาใช้งานจริง รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้อัลกอริทึมค้นหาสัญญาณ เช่น การใช้ Adaptive Tabu Search (ATS) [4] ในการค้นหาข้อมูลลายน้ำในสัญญาณเสียงดิจิทัล ซึ่งอัลกอริทึมจะมีความซับซ้อนจนไม่สะดวกต่อการนำมาใช้งานจริง

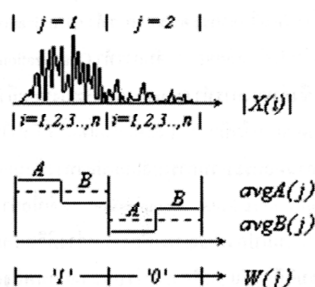
ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงกลับไปเริ่มต้นศึกษาจากเทคนิคในยุคเริ่มแรกของการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิทัล คือเทคนิคที่อาศัยระดับอ้างอิงเทียบกับค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดในกลุ่มสัญญาณเสียงของแต่ละกลุ่ม ดังอัลกอริทึมในรูปที่ 1 ซึ่งยังสามารถแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนวิธีการโดยใช้เทคนิคการเพิ่มระดับอ้างอิงลงในกลุ่มข้อมูล เพื่อให้ลายน้ำมีความทนทานต่อการโจมตีในรูปแบบการปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ และส่งผลให้ลายน้ำสามารถรองรับการโจมตีในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเสียงระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก ดังผลการทดลองที่ปรากฏในบทความงานวิจัย ชิ้นนี้นั่นเอง



รูปที่ 1. การปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยกลุ่มสัญญาณเทียบกับระดับอ้างอิง

2. แนวทางการออกแบบอัลกอริทึม

อัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ ปรับเปลี่ยนด้วยการเพิ่มจุดอ้างอิงในกลุ่มข้อมูลที่ใช้ฟังลายน้ำ แทนการตั้งค่าระดับอ้างอิงในรูปแบบเดิม ตามวิธีการในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยในกลุ่มของสัญญาณทั้งสองกลุ่มที่แบ่งไว้ตามสมการที่ 1 และ 2



รูปที่ 2. ลักษณะการเพิ่มจุดอ้างอิงในกลุ่มสัญญาณที่ปรับเปลี่ยน

$$avgA(j) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} |X(i)| \quad (1)$$

$$avgB(j) = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n |X(i)| \quad (2)$$

$$\begin{cases} avgA'(j) = avgA(j) \times \alpha \\ avgB'(j) = avgB(j) / \alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} avgA'(j) = avgA(j) / \alpha \\ avgB'(j) = avgB(j) \times \alpha \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ $avgA(j)$ คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูล A
 $avgB(j)$ คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูล B
 $X(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียง

ในการฟังข้อมูลลายน้ำลงในสัมประสิทธิ์ทางการแปลงเวฟเลต จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าเฉลี่ยในกลุ่มของสัญญาณทั้งสองกลุ่มที่แบ่งไว้ให้มีระดับของค่าเฉลี่ยอยู่ระดับเดียวกัน ก่อนปรับค่าเฉลี่ยของทั้ง

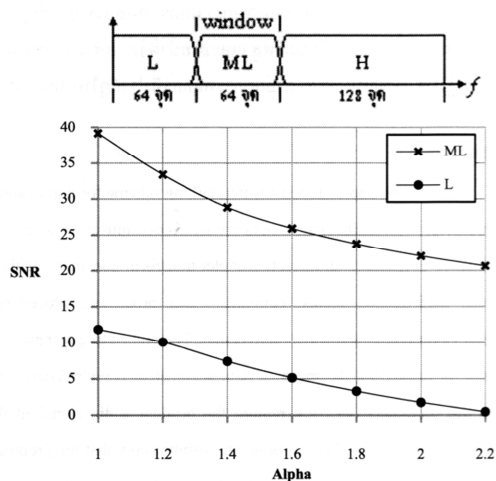
สองกลุ่มสัญญาณ ให้มีระดับที่ต่างกันด้วยอัตราค่า Alpha (α) โดยมีเงื่อนไขของการฟังสัญญาณลายน้ำ ตามสมการที่ 3 และ 4

เพื่อให้สัญญาณเสียงที่ได้หลังจากการฟังสัญญาณลายน้ำมีคุณภาพเสียงที่ดี จึงได้ทำการทดสอบหาช่วงของสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตที่เหมาะสมสำหรับการฟังลายน้ำ โดยทดสอบในย่านความถี่ต่ำ (L) และย่านความถี่กลางที่ค่อนข้างต่ำ (ML) ดังมีกราฟเปรียบเทียบค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) [5] กับ Alpha แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าย่านความถี่ที่เหมาะสมคือ ML

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^k X(i)^2}{\sum_{i=1}^k [X(i) - X^w(i)]^2} \quad (5)$$

โดยที่

$X(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงต้นฉบับ
 $X^w(i)$ คือ ข้อมูลสัญญาณเสียงที่ฟังลายน้ำ



รูปที่ 3. ค่าของ SNR เทียบกับ Alpha โดยการฟังตัวในแต่ละแถบความถี่

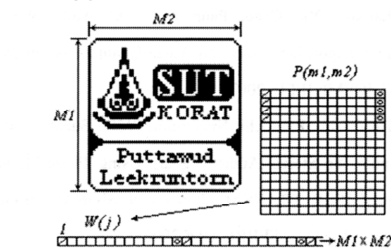
จากการทดลองขั้นต้นพบว่า ผลที่เกิดขึ้นจากการปรับขนาดของกลุ่มข้อมูล (window) จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า SNR แต่มีผลต่อค่าความจุสัญญาณลายน้ำ ตามสมการที่ 6 ดังนั้นจึงสามารถปรับขนาดของกลุ่มข้อมูลได้ตามความเหมาะสม เช่น ถ้ามีขนาดน้อยเกินไปจะทำให้การจับกลุ่มข้อมูลเพื่อใช้ในขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำทำได้ยาก แต่ถ้าปรับขนาดมากเกินไปค่าความจุสัญญาณลายน้ำจะมีค่าน้อยลง เป็นต้น

$$\text{ค่าความจุสัญญาณลายน้ำ} = \frac{f_s}{\text{window} \times 4} \quad \text{bps} \quad (6)$$

โดยที่ f_s คือ ความถี่ของการซัดตัวอย่าง
window คือ ขนาดของกลุ่มข้อมูล

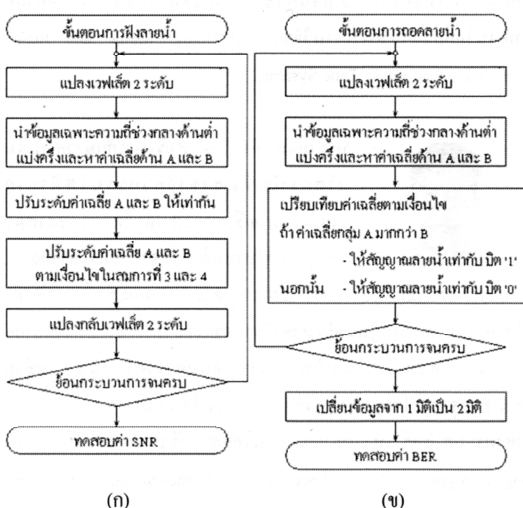
3. ขั้นตอนการฝังและถอดลายน้ำดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำดิจิทัลที่เป็นภาพโปสเตอร์ทั้งนี้เพื่อเป็นการบ่งบอกให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงผู้ที่เป็นเจ้าของลายน้ำนั้น และเนื่องจากข้อมูลสัญญาณเสียงที่ใช้ทำการฝังลายน้ำอยู่ในรูปแบบสัญญาณ 1 มิติ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนภาพลายน้ำให้เป็น 1 มิติตามวิธีการในรูปที่ 4 เมื่อได้ลายน้ำดิจิทัลซึ่งเป็นข้อมูล 1 มิติ ก็สามารถดำเนินการฝังสัญญาณลายน้ำตามอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4. ลักษณะการเปลี่ยนข้อมูลลายน้ำจาก 1 มิติเป็น 2 มิติ

แผนภาพแสดงอัลกอริทึมของการฝังสัญญาณลายน้ำแสดงในรูปที่ 5(ก) โดยอาศัยเทคนิคของการออกแบบอัลกอริทึมที่แสดงในหัวข้อที่ 2 คุณภาพของสัญญาณเสียงที่ได้หลังจากการฝังลายน้ำ จะทำการประเมินค่าด้วยการคำนวณ SNR ดังแสดงสมการการคำนวณในสมการที่ 5 ขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำ เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับจากขั้นตอนการฝังสัญญาณลายน้ำ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเสียงต้นฉบับในกระบวนการถอดสัญญาณลายน้ำแต่อย่างใด และภาพลายน้ำที่ได้จากขั้นตอนการถอดสัญญาณลายน้ำที่แสดงในรูปที่ 5(ข) สามารถประเมินความถูกต้องด้วยค่า Bit Error Ratio (BER)[5] ตามสมการที่ 7



รูปที่ 5. แผนภาพแสดงขั้นตอน การฝังและการถอดลายน้ำดิจิทัล

$$BER = \frac{\text{จำนวนบิตข้อมูลที่ผิดพลาด}}{\text{จำนวนบิตข้อมูลทั้งหมด}} \times 100 \% \quad (7)$$

4. การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้สัญญาณเสียงดิจิทัลที่บันทึกจากเสียงเพลงประเภท Dance, Rock, Pop, ลูกทุ่ง, เดี่ยวขลุ่ย และ เดี่ยวระนาด โดยมีค่าความถี่ของการสุ่มตัวอย่างที่ 48KHz เข้ารหัสสัญญาณด้วยจำนวนบิต 16 บิต ความยาวของสัญญาณประมาณ 3 ถึง 4 นาที สัญญาณลายน้ำเป็นภาพโปสเตอร์ขนาด 64x64 บิต โดยค่าความจุของลายน้ำอยู่ที่ 187.5 bps การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ประกอบด้วย การทดสอบคุณภาพด้วยการคำนวณค่า SNR และการทดสอบความคงทนของสัญญาณลายน้ำด้วยการโจมตีสัญญาณลายน้ำโดยวิธี กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน แทรกสัญญาณรบกวนและการบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression ผลการทดสอบค่า SNR และ BER ที่แสดงในตารางที่ 1 ใช้สัญญาณเสียงเพลงประเภทเดี่ยวระนาดซึ่งพบว่าลายน้ำมีความทนทานมากขึ้นเมื่อค่าของ SNR น้อยลงหรือระดับของ Alpha มีค่ามากขึ้นโดยลักษณะของภาพสัญญาณลายน้ำที่ถอดได้ก็ระดับค่า BER ต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 1. ค่า BER ต่อการโจมตีด้วยรูปแบบพื้นฐานต่างๆ

Alpha	SNR (dB)	BER (%)			
		LowPass fc = 1KHz	HighPass fc = 1KHz	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz
1.2	33.3859	0.0000	0.0000	1.0312	26.0156
1.4	28.8243	0.0000	0.0000	0.5156	21.1406
1.6	25.8898	0.0000	0.0000	0.2500	16.1250
1.8	23.7468	0.0000	0.0000	0.1250	8.0000
2.0	22.0548	0.0000	0.0000	0.1250	5.3906
2.2	20.6525	0.0000	0.0000	0.2344	3.5625



รูปที่ 6. ภาพลายน้ำที่ผ่านการโจมตี โดยมีระดับค่า BER ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้สนใจการโจมตีอยู่ 2 รูปแบบคือ การโจมตีด้วยการปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณด้วยระดับอัตรา 0.2 ถึง 1.8 เท่า และการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปสัญญาณระหว่างดิจิทัลกับแอนะล็อก โดยใช้สายส่งสัญญาณเสียงแบบแอนะล็อก เป็นสื่อกลางในการเชื่อมต่อ ผลการทดลองจากการโจมตีทั้งสองแบบ แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมของการฝังสัญญาณลายน้ำนี้มีความทนทานต่อการโจมตีทั้งสองรูปแบบนี้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2. ผลจากการโจมตีด้วย การขยายสัญญาณ และ DAC & ADC

Alpha	SNR (dB)	BER (%)				DAC & ADC
		ค่าอัตราการปรับระดับสัญญาณ (เท่า)				
		0.2	0.8	1.2	1.8	
1.2	33.3859	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06250
1.4	28.8243	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.6	25.8898	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.8	23.7468	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.0	22.0548	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2.2	20.6525	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับข้อมูลเสียงเพลงประเภทต่างๆ โดยกำหนดค่า Alpha เท่ากับ 1.4 และขนาดของกลุ่มข้อมูลเท่ากับ 64 จุด ซึ่งพบว่าเพลงประเภท Dance, Rock และ Pop มีค่า SNR ที่ต่ำ เนื่องจากเพลงประเภทดังกล่าวมีรายละเอียดของข้อมูลกระจายตัวอยู่ในช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกับย่านความถี่ที่ใช้ส่งสัญญาณลายน้ำ แต่ผลที่ได้คือ มีความทนทานต่อการโจมตีได้ดีขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยของ SNR มีค่าเท่ากับ 24.0619 dB ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานของ IFPI และค่าเฉลี่ยของ BER จากการโจมตีด้วยการแทรกสัญญาณรบกวน การบีบอัดข้อมูลด้วยวิธี MP3 Compression และการเปลี่ยนรูปสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อก มีค่าเท่ากับ 0.0938% 11.2995% และ 0.0000% ตามลำดับ

ตารางที่ 3. ผลการทดลองด้วยตัวอย่างเพลงตามประเภทต่างๆ

รูปแบบเพลง	SNR (dB)	BER (%)			
		No Attack	Noise -10 dB	MP3 32Kbit 48KHz	DAC & ADC
Dance	21.6968	0.0000	0.0000	5.2656	0.0000
Rock	21.7068	0.0000	0.0000	8.6719	0.0000
Pop	22.7270	0.0000	0.0000	6.3906	0.0000
ลูกทุ่ง	24.2587	0.0000	0.0000	9.3125	0.0000
เคียวคู่เพียงขอ	25.1575	0.0000	0.0469	17.0156	0.0000
เคียวระนาดเอก	28.8243	0.0000	0.5156	21.1406	0.0000

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทดสอบด้วยเพลงแต่ละแบบจะได้ค่า SNR ที่ไม่เท่ากันทั้งที่ระดับค่า Alpha เท่ากัน แต่พบว่าระดับของ SNR จะมีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพของลายน้ำโดยตรง ดังนั้นค่าของ Alpha จึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพของลายน้ำดิจิตอลต่อการใช้งานในแต่ละรูปแบบนั่นเอง

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอลด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลตในย่านความถี่กลางก่อนไปทางด้านความถี่ต่ำ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนี้มีความทนทานต่อการโจมตีโดยการปรับขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณด้วยระดับอัตราต่างๆ และยังมี ความทนทานต่อการโจมตีด้วยการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณระหว่างดิจิตอลกับแอนะล็อกได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนการคืนระดับสัญญาณในระดับที่เหมาะสมก่อนทำการถอดสัญญาณลายน้ำ

แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคตคือ การสร้างระบบการทำลายน้ำสัญญาณเสียงดิจิตอลที่มีการประมวลผลแบบเวลาจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shijun Xiang, Jiwu Huang, "Analysis of D/A and A/D Conversions in Quantization-based Audio Watermarking", International Journal of Network Security, Vol.3, No.3, PP.230-238, Nov. 2006.
- [2] Wang Lanxun, Yin Chao, Pang Jiao, "An Audio Watermark Embedding Algorithm Based on Mean-Quantization in Wavelet Domain", ICEMI, IEEE, 2007.
- [3] Akira Takahashi, Ryouichi Nishimura, Yôiti Suzuki, "Multiple Watermarks for Stereo Audio Signals Using Phase-Modulation Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 53, NO. 2, FEBRUARY 2005.
- [4] N. Sriyingyong, K. Attakitmongkol, "Wavelet-Based Audio Watermarking Using Adaptive Tabu Search", IEEE 2006.
- [5] Liu Hai-yan, Zheng Xue-feng, Wang Ying, "DWT-Based Audio Watermarking Resistant to Desynchronization", IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2007.

ประวัติผู้เขียนบทความ



พชรวิชญ์ ลิขิตกร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเกี่ยวกับ Digital Signal and Image Processing และ Real - Time Systems.



ประยชน์ คำสวัสดิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก โรงเรียนนายเรืออากาศ และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเดียวกันจาก มหาวิทยาลัย

เกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2537 และ 2541 ตามลำดับและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเกี่ยวกับ Digital Signal and Image Processing และ Embedded and Real - Time Systems.